



**Universidade de Aveiro**

Departamento de Ambiente e Ordenamento

**Ano 2013**

**Daniela dos Santos   Valorização de Resíduos Orgânicos da Indústria  
Martins                    Agro-alimentar**





**Daniela dos Santos  
Martins**

**Valorização de Resíduos Orgânicos da Indústria  
Agro-Alimentar**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes, Professora auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro



*"Transforme as pedras que você tropeça nas pedras de sua escada"*

Sócrates

## **O júri**

### **Presidente**

**Professor Doutor Arlindo Amador de Matos**

Professor Auxiliar do departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

### **Vogais**

**Professora Doutora Etelvina Maria de Almeida Paula Figueira**

Professora Auxiliar do Departamento de Biologia da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes**

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos**

Agradeço á minha orientadora, Professora Doutra Ana Paula Duarte Gomes, pela ajuda prestada durante a execução deste trabalho.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo que sempre me deram e à minha irmã por todo o apoio prestado durante a execução deste trabalho.

A todos os meus amigos que de um modo ou de outro sempre me apoiaram fazendo com que esta etapa se tornasse mais fácil de percorrer.



## Palavras-chave

Resíduo urbano, compostagem, resíduo biodegradável

## Resumo

A preocupação com a gestão e o tratamento de resíduos urbanos tem vindo a crescer nos últimos anos. Devido à má gestão destes resíduos e aos efeitos negativos para o Ambiente, a correta gestão tornou-se num ponto fulcral para o Ambiente. Estes resíduos representam uma grande quantidade dos resíduos gerados no nosso País. Daí a necessidade de se encontrarem formas de redução do impacto negativo, para os solos, a água e ar. A deposição em aterro era encarada como a solução mais viável, contudo com o evoluir da ciência veio a descobrir-se outras operações de redução de resíduos com menos impacto no ambiente. A compostagem passa por uma dessas soluções.

A compostagem é uma operação de tratamento da fração biodegradável dos resíduos urbanos, através da sua decomposição biológica aeróbia que dá origem a um produto estabilizado e humificado. A sua aplicação evita a acumulação de resíduos em aterro e permite fornecer aos solos nutrientes que são necessários ao crescimento das plantas.

Na elaboração deste trabalho realizou-se um projeto de compostagem à escala laboratorial, por forma a avaliar a degradação da casca de batata, resíduo originado na preparação de alimentos, de modo a obter um composto estabilizado. Foram testadas diferentes condições operatórias, tipo de mistura e temperaturas da gama mesófila e termófila.

O trabalho experimental decorreu com a análise de duas misturas de casca de batata misturada com casca de arroz e relva, em proporções diferentes, tendo sido monitorizados os parâmetros, temperatura, teor de CO<sub>2</sub>, humidade, pH, sólidos voláteis, cinzas, lenhina Klason e azoto Kjeldahl.

No fim do procedimento experimental o produto final também foi avaliado segundo os mesmos parâmetros. A conclusão é que a melhor mistura seria a RH<sub>1</sub> (74% de casca de batata, 8,3% de relva e 17,7% de casca de arroz) degradando à temperatura de 50°C, para a qual se registou uma conversão em CO<sub>2</sub> de 64% do carbono orgânico presente na mistura.



## Keywords

Urban waste, composting, biodegradable waste

## Abstract

The concern with the management and treatment of urban waste has been growing in recent years. Due to poor management of this waste and environment effects, the correct management has become a focal point for the environmental. These waste, represent a lot of waste of what is generated in our country. Hence the need to find ways to reduce the negative impact to soil, water and air. The landfill was seen as the most viable solution, however with the progress of science came to discover other operations to reduce waste with less impact on the environment. Composting goes through one of these solutions.

Composting is a processing operation applicable to the biodegradable fraction of municipal waste, through its aerobic biological decomposition yields a stabilized and humus rich product. Its use prevents accumulation of waste in landfills and allows provide to soil the nutrients that are necessary for plant growth. With the development of this work was performed a composting project at laboratory scale in order to assess the degradability of potato peel, residue originated in food preparation, in order to obtain a stabilized compound. Different operating conditions, type of mixing and temperatures of mesophilic and thermophilic range, were tested.

The experimental work held in the analysis of two mixtures of potato peel mixed with rice husk and grass in different proportions. The parameters, temperature, CO<sub>2</sub> concentration, moisture, pH, volatile solids, ash, Klason lignin and Kjeldahl nitrogen, were monitored.

At the end of experimental procedure the final product was also tested using the same parameters. The conclusion is that the best mix would be the RH<sub>1</sub> (74% of potato peel, 8,3% grass and 17,7% rice husk) degrading at a temperature of a 50°C. For this condition the conversion of organic carbon present in the mixture to carbon dioxide reached 64%.



## Índice

1	Introdução .....	1
1.1	Gestão de Resíduos .....	1
1.2	Gestão de Resíduos Biodegradáveis .....	2
1.3	Ideia que motivou o trabalho .....	4
1.4	Objetivo do trabalho .....	5
1.5	Metodologia para atingir o objetivo .....	5
1.6	Estrutura da dissertação .....	5
2	Produção de resíduos Urbanos em Portugal .....	8
2.1	Gestão de Resíduos Urbanos em Portugal .....	8
3	Processo de Compostagem .....	12
3.1	Breve História da Compostagem .....	12
3.2	Definição de Compostagem .....	12
3.3	Objetivos e Aplicação da Compostagem .....	14
3.4	Os parâmetros que afetam o processo de compostagem .....	14
3.5	Vantagens e limitações do processo de compostagem .....	20
3.6	O composto .....	21
3.6.1	Vantagens Versus limitações da aplicação do composto no solo .....	21
3.6.2	Rótulo ecológico .....	22
4	Fundamentos da Modelação .....	26
4.1	Modelação .....	26
4.2	Revisão Bibliográfica .....	27
5	Ensaio Laboratoriais de Compostagem .....	31
5.1	Objetivos .....	31
5.1.1	Objetivo Geral .....	31
5.1.2	Objetivos específicos .....	31
5.2	Instalação Laboratorial .....	31
5.3	Metodologia .....	35
5.3.1	Plano experimental .....	36
5.3.2	Monitorização da fase gasosa .....	37
5.3.3	Análise da fase sólida .....	37
5.4	Caraterização do substrato Orgânico .....	39
5.4.1	Caraterização da mistura inicial .....	39
6	Apresentação e discussão dos Resultados experimentais .....	41
6.1	Monitorização dos ensaios de compostagem .....	41
6.1.1	CO <sub>2</sub> produzido ao longo do processo .....	41
6.1.2	Caraterização do material compostado e grau de conversão .....	42
6.2	Primeiro ensaio Amostra RH <sub>1</sub> .....	43

6.2.1	CO <sub>2</sub> produzido .....	44
6.2.2	Variação do teor de humidade .....	48
6.2.3	Caraterização do material compostado e grau de conversão .....	49
6.3	Segundo Ensaio Amostra RH <sub>4</sub> .....	52
6.3.1	CO <sub>2</sub> Produzido .....	52
6.3.2	Variação do teor de humidade .....	57
6.3.3	Caraterização do material compostado e grau de conversão .....	58
7	Conclusões.....	62

## Índice de Figuras

Figura 1 - Evolução da Produção de RU ao longo dos anos (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013c).....	9
Figura 2 - Evolução da gestão de resíduos desde 2007 a 2011 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013c).....	10
Figura 3 - Caracterização física de RU em % em Portugal (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013c).....	10
Figura 4 - Destino final dos resíduos biodegradáveis em 2011 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013a) .....	11
Figura 5 – Exemplo genérico das fases da temperatura durante o processo de compostagem (UniSant’ana,2013) .....	13
Figura 6 - Apresentação geral dos modelos de compostagem (Mason, 2006) .....	28
Figura 7 - Lista de estudos encontrados na literatura sobre os diferentes modelos utilizados por diferentes autores. A última linha refere-se ao número total de estudos referidos em cada coluna (Baptista, 2009).....	30
Figura 8 - Representação esquemática da instalação laboratorial.....	32
Figura 9 - Vista frontal dos quatro reatores de compostagem da instalação.....	33
Figura 10 - Unidade de controlo térmico da instalação.....	33
Figura 11 - Unidade de medida da instalação.....	34
Figura 12 - Unidade de controlo da instalação.....	34
Figura 13 - Analisador de CO <sub>2</sub> Vaisala GMM111 Compact .....	35
Figura 14 - Computador associado à instalação .....	35
Figura 15 – Misturas orgânicas usadas neste estudo.....	39
Figura 16 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio A1 a 70°C .....	44
Figura 17 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio B1 a 50°C .....	44
• Figura 18 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio C1 a 40°C .....	45
Figura 19 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio D1 a 30°C.....	45
Figura 20 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio A1 a 70°C .....	46
Figura 21 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio B1 a 50°C .....	47
Figura 22 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio C1 a 40°C .....	47

Figura 23 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio D1 a 30°C .....	47
Figura 24 – CO <sub>2</sub> acumulado dos quatro ensaios da mistura RH <sub>1</sub> .....	48
Figura 25 – Variação do teor de humidade na mistura RH <sub>1</sub> às diferentes temperaturas.....	49
Figura 26 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio A2 a 70°C .....	52
Figura 27 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio B2 a 50°C .....	53
Figura 28 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio C2 a 40°C.....	53
Figura 29 - Variação do teor de CO <sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio D2 a 30°C.....	54
Figura 30 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio A2 a 70°C .....	55
Figura 31 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio B2 a 50°C .....	55
Figura 32 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio C2 a 40°C .....	56
Figura 33 - Volume de CO <sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio D2 a 30°C .....	56
Figura 34 - CO <sub>2</sub> acumulado dos quatro ensaios da mistura RH <sub>4</sub> .....	56
Figura 35 - Variação do teor de humidade na mistura RH <sub>4</sub> às diferentes temperaturas .....	58



## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de materiais que podem ser sujeitos a decomposição microbológica (ideias ambientais 2013) .....	3
Tabela 2 - Vantagens e limitações no processo de degradação biológica (Matos, 2008; Cordeiro, 2010) .....	20
Tabela 3 - Vantagens versus Limitações da aplicação do composto no solo (Matos,2008; Felícia, 2009 .....	21
Tabela 4 - Critérios para a atribuição do Rótulo Ecológico.....	22
Tabela 5 - Listagem dos Resíduos que podem ser utilizados para a produção de Composto.....	23
Tabela 6 – Composição, em base seca, das misturas usadas no estudo .....	36
Tabela 7 - Condições operacionais dos ensaios experimentais .....	36
Tabela 8 - Parâmetros e técnicas de análise da fase sólida.....	38
Tabela 9 – Caraterização das misturas iniciais .....	40
Tabela 10 – Variação do teor de Humidade ( $W_{WH}$ ) ao longo do tempo em pontos de amostragem .....	49
Tabela11 – Caraterização do produto final do processo da compostagem do 1º ensaio .....	50
Tabela12 - Variação do pH das purgas .....	50
Tabela 13 - Valores de massa seca da amostra, volume máximo esperado de $CO_2$ e massa de carbono a diferentes temperaturas .....	51
Tabela 14 – Grau de conversão de sólidos voláteis, Volume máximo esperado de $CO_2$ , Volume de $CO_2$ acumulado e percentagem de Carbono degradado .....	51
Tabela 15 – Variação do teor de Humidade ( $W_{WH}$ ) ao longo do tempo em pontos de amostragem .....	58
Tabela 16 - Caraterização do produto final do processo da compostagem do 2º ensaio .....	59
Tabela17 - Variação do pH das purgas .....	59
Tabela 18 - Valores de massa seca da amostra, volume máximo esperado de $CO_2$ e massa de carbono a diferentes temperaturas .....	60
Tabela 19 - Grau de conversão de sólidos voláteis, Volume máximo esperado de $CO_2$ , Volume de $CO_2$ acumulado e percentagem de Carbono degradado .....	60



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 GESTÃO DE RESÍDUOS

Os problemas causados pelos resíduos são tão velhos quanto a humanidade. Quando o Homem começou a sedentarizar-se, trouxe consigo problemas de ordem ambiental. Não havendo hábitos de higiene, os rios e lagos foram poluídos com esgotos e resíduos.

A produção de resíduos urbanos (RU) continua a desempenhar um papel importante na nossa sociedade onde o consumismo é cada vez mais evidente. A consciencialização da população em geral é muito importante para a resolução deste problema. A informação e a sensibilização para estas questões são fundamentais, para que as pessoas sejam confrontadas com o que sucede aos resíduos que produzem diariamente sem se preocuparem com a sua separação adequada, ou com as consequências dos seus atos muitas vezes descuidados.

A deposição de resíduos em Aterros Sanitários tem sido o método de eliminação mais implementado no nosso País.

Contudo, a deposição em aterro levanta alguns problemas ambientais, que a curto/longo prazo se fazem sentir, nomeadamente;

- A produção de biogás e outros compostos com impactes ao nível do efeito estufa
- Produção de odores
- Riscos de explosão
- Produção de lixiviados com elevada carga orgânica
- Ocupação de volume em aterro
- Assentamentos (ideias ambientais,2013)

No âmbito da gestão dos RU e face à situação existente, os aterros foram encarados como necessários para resolução do passivo ambiental. Neste sentido, foram em cerca de 6 anos erradicadas as lixeiras e criadas as infraestruturas de deposição e eliminação de resíduos, em pleno cumprimento dos requisitos técnicos e ambientais definidos na legislação em vigor.

Esta a primeira etapa implementada para a gestão de resíduos.

Paralelamente a esta etapa deu-se início de forma generalizada, à recolha seletiva de embalagens e outros materiais componentes dos RU, tendo como objetivo o cumprimento faseado de metas estabelecidas para os diferentes materiais alvos.

## **1.2 GESTÃO DE RESÍDUOS BIODEGRADÁVEIS**

O Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos II (PERSU II), é bastante claro na definição das metas a atingir, e aponta para construção de aterros e incineradoras, paralelamente com a valorização da matéria orgânica através da compostagem e o incremento da reciclagem. As metas apontadas a longo prazo para esta problemática, evidenciam a necessidade de adotar medidas até 2016, a fim de valorizar as componentes orgânicas através de processos viáveis e economicamente rentáveis, conforme preconizado pela Diretiva de Aterros 1999/76 (CE) da comunidade europeia, atualmente transposta para direito nacional pelo Decreto-Lei nº 183/2009, relativo à deposição de resíduos em aterros. Segundo este plano, é estabelecido como meta para 2016, valores de produção anuais de resíduos urbanos na ordem das 4.937 milhões de toneladas. Apontando, assim, para uma redução de 10% de captação média diária, relativamente aos valores referentes a 2007 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013a).

A estratégia nacional para a redução de resíduos urbanos biodegradáveis destinados a aterros (ENRRUBDA, 2003), evidência a necessidade de uma correta gestão dos resíduos urbanos biodegradáveis (RUB), uma vez que estes representam cerca de 60% dos RU produzidos (ideias ambientais, 2013).

Os RUB são os resíduos urbanos que podem ser sujeitos a decomposição microbiológica, anaeróbia ou aeróbia e podem ser classificados como, verdes e castanhos. Os verdes têm maior quantidade de azoto, os castanhos são os que contém maior quantidade de carbono, apresentando-se na tabela 1 alguns exemplos. São as quantidades destes materiais que irão contribuir para a rapidez e eficiência do processo de estabilização microbiológica.

**Tabela 1** - Exemplos de materiais que podem ser sujeitos a decomposição microbológica (ideias ambientais 2013)

VERDES		CASTANHOS
Casca de batata	Arroz	Feno
Ervilhas	Massa	Palha
Legumes	Cascas de ovos esmagadas	Aparas de madeira e serradura
Hortaliças	Folhas e sacos de chá	Aparas de relva e erva
Restos e casca de frutos	Cereais	Folhas secas
Casca de frutos secos	Restos de comida cozinhada	Ramos pequenos
Borras de café		Pequenas quantidades de cinzas de madeira
Cascas de pão		

A compostagem é um processo de reciclagem dos nutrientes da fração fermentável dos RU, bem como dos resíduos provenientes da limpeza de parques e jardins, ou seja dos biorresíduos. É um processo caracterizado pela decomposição aeróbia dos resíduos a temperaturas elevadas (50°C - 70°C), com crescimento de microrganismos termófilos e libertação de energia sob a forma de calor.

O produto que se obtém no final é o composto. Este poder ser aplicado no solo desempenhando diferentes funções;

- **Como condicionador de solo em solos agrícolas** - deve apresentar níveis de qualidade relativamente às características, físicas, química e biológicas. Não deve conter materiais aguçados considerados prejudiciais para o ser humano e para os animais, ou outros organismos. Não deve conter contaminantes químicos, excedendo os valores máximos admissíveis regulamentados, nomeadamente metais pesados. Deve estar isento de microrganismos patogénicos.
- **Imobilização de azoto** – “O azoto orgânico existe nos compostos em formas facilmente mineralizáveis e em formas que podem demorar meses ou anos a serem mineralizados. As primeiras, facilmente mineralizáveis, contribuirão mais para a nutrição das culturas no curto prazo, pelo contrário, as segundas contribuirão mais para o aumento da fertilidade do solo no longo prazo”, citado por Brito (2005).

- **Mineralização de azoto** - Aumentar a eficiência com que o azoto mineral disponível para as plantas é utilizado, o que pode ser conseguido pela aplicação de produtos ricos em húmus que, tendo razões C/N elevadas, retêm o azoto mineral (da fertilização química) e o libertam depois gradualmente, diminuindo, por esta via, o excesso de azoto nítrico no solo, o qual, pode conduzir à acumulação excessiva de nitratos nas folhas das plantas, para além de causar problemas de poluição potencial, por exemplo pela lixiviação de nitratos para as águas subterrâneas ou de volatilização de gases azotados para a atmosfera.

A qualidade do composto está inteiramente ligada à separação dos resíduos, que pode ser feita de diversas formas. O mais adequado é garantir que a separação ocorra na fonte e não apresente riscos de contaminação, pois apenas são separados os resíduos que realmente podem ser utilizados no processo por conterem matéria orgânica biodegradável. De salientar que na maioria dos casos, os RU não são separados corretamente e acabam por conter componentes considerados indesejáveis (pilhas, plásticos, vidros, metais) acabando assim por reduzir a qualidade do composto final.

Um dos objetivos principais da compostagem é assim, converter os compostos orgânicos putrescíveis num material biologicamente estável e assegurando a estabilização dos microrganismos patogénicos para o ser humano (Haug, 1993).

### 1.3 IDEIA QUE MOTIVOU O TRABALHO

Uma das opções de valorização de alguns resíduos da indústria alimentar consiste em submetê-los a um processo de compostagem, o qual permite reduzir o volume de resíduos orgânicos até 40% e obter um composto final estável que pode ser benéficamente aplicado ao solo.

A casca de batata faz parte do inventário de resíduos orgânicos associados à indústria de produção de batatas fritas, estimando-se que durante o processo fabril as perdas causadas pelo descasque da batata representem 15 a 40% do valor total utilizado como matéria-prima.

Como a casca de batata é um resíduo bastante húmido, com elevada massa específica e desequilibrado em termos de nutrientes, o seu processamento por compostagem requer a incorporação de um agente estruturante (casca de arroz) e um componente rico em azoto (aparas de relva).

O presente trabalho, surge duma colaboração com outra equipa de investigação, que tem avaliado a aplicação do processo de compostagem à estabilização de misturas constituídas pelos resíduos, casca de batata, casca de arroz e relva.

Tendo já sido estudado o parâmetro composição de mistura, foram selecionadas duas misturas, com diferentes proporções dos seus componentes (casca de batata, casca de arroz e relva), que se revelaram as mais adequadas.

Para essas misturas foi necessário estudar o efeito de diferentes parâmetros processuais, nomeadamente a temperatura, parâmetro este, que se tornou o alvo de estudo do presente trabalho.

#### **1.4 OBJETIVO DO TRABALHO**

Este trabalho tem como objetivo estudar à escala laboratorial, o processo de compostagem de casca de batata (de origem industrial), de modo a determinar a influência da temperatura e do teor de oxigénio da fase gasosa, no processo de degradação da matéria orgânica, bem como verificar se é possível a sua compostagem ou não, e se este composto é candidato a ser um condicionador/corretivo de solos, que “inclui materiais adicionados ao solo no local para, principalmente, manter ou melhorar as suas propriedades físicas e que são suscetíveis de melhorar as suas propriedades ou atividades químicas e/ou biológicas” (Decisão da Comissão 2006/799/CE de 3 de novembro de 2006).

#### **1.5 METODOLOGIA PARA ATINGIR O OBJETIVO**

O trabalho que se propõe, engloba a monitorização de acordo com alguns parâmetros físico-químicos, através de testes experimentais em reatores isotérmicos. Foram analisadas duas misturas com composições diferentes, sujeitas a uma compostagem laboratorial em ambiente isotérmico e controlado.

#### **1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

No capítulo 1 (em que o leitor se situa), foi introduzido o tema da dissertação, apresentada a ideia que motivou o presente trabalho, apresentados o objetivo e a metodologia. No capítulo 2 será abordada a questão da gestão dos RU em Portugal.

No capítulo 3, será apresentada a temática da compostagem, nomeadamente os objetivos, os parâmetros de controlo, químicos, físicos e biológicos mais significativos no processo de compostagem, juntamente com as vantagens e limitações do processo.

No capítulo 4, serão abordadas algumas questões sobre a modelação de processos de compostagem. No capítulo 5, é indicado os objetivos específicos do estudo, sendo explicado todo o procedimento experimental com alusão à instalação usada durante os ensaios. É ainda feita uma caracterização do substrato orgânico.

No capítulo 6, são apresentados os resultados obtidos durante o decorrer do estudo.

Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões sobre o processo de compostagem realizado à escala laboratorial.





## **2 PRODUÇÃO DE RESÍDUOS URBANOS EM PORTUGAL**

### **2.1 GESTÃO DE RESÍDUOS URBANOS EM PORTUGAL**

Os RU, são o resultado da atividade doméstica e comercial das populações. A sua composição varia de população para população, dependendo da situação socioeconómica e das condições e hábitos de vida de cada um. Esses resíduos podem ser classificados da seguinte forma:

- Matéria orgânica: Restos de comida, da sua preparação e limpeza
- Papel e papelão: Jornais, revistas, caixas e embalagens
- Plásticos: Garrafas, garrafões, frascos, boiões e outras embalagens
- Vidro: Garrafas, frascos, copos
- Metais: Latas
- Outros: Roupas, óleos de cozinha e óleos de motor, resíduos informáticos

Existem também alguns tipos de resíduos diferentes dos comumente encontrados e que são denominados tóxicos. Estes necessitam de um destino especial para que não contaminem o ambiente e os que nele habitam, como sejam os aerossóis vazios, pilhas, baterias, lâmpadas fluorescentes, restos de medicamentos e outros (Wikipedia, 2013).

Os resíduos classificados como orgânicos (matéria orgânica) têm origem animal ou vegetal. Nessa categoria inclui-se grande parte do lixo doméstico, restos de alimentos, folhas, sementes, restos de carne e ossos, entre outros (Wikipedia, 2013), ou seja são todos aqueles que apresentam uma constituição propícia à biodegradação natural, devendo ser excluídos os produtos de papel e derivados que apresentem condições adequadas à reciclagem (Felicía)

A necessidade de minimizar a produção de resíduos assegurando a sua gestão sustentável, tornou-se numa questão de cidadania. Existe cada vez mais a ideia de que a gestão de resíduos deve dizer respeito tanto ao produtor como ao consumidor.

O regime jurídico de gestão de resíduos foi, pela primeira vez aprovado em Portugal pelo Decreto-Lei nº 488/85, de 25 de Novembro.

O Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de junho foi a terceira alteração ao Decreto-Lei 178/2006, do regime jurídico de gestão de resíduos e prevê um conceito mais alargado, abrangendo todos os resíduos semelhantes aos resíduos domésticos,

independentemente dos quantitativos diários produzidos. A definição atualmente em vigor é a seguinte: "resíduo proveniente de habitações, bem como outro resíduo que, pela sua natureza ou composição, seja semelhante ao resíduo proveniente de habitações" (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013b).

Assim, são considerados resíduos urbanos os resíduos produzidos:

- Pelos agregados familiares (resíduos domésticos)
- Por pequenos produtores de resíduos semelhantes (produção diária inferior a 1.100 l)
- Por grandes produtores de resíduos semelhantes (produção diária igual ou superior a 1.100 l)

Com a publicação da Portaria n.º 851/2009, de 07 de agosto, foram aprovadas as normas técnicas relativas à caracterização de resíduos urbanos, designadamente a identificação e quantificação dos resíduos correspondentes à fração caracterizada como reciclável.

Em 2011, foram produzidas em Portugal, 5.159 mil toneladas de RU, menos 305 mil toneladas que em 2010, o que representa um decréscimo de cerca de 6% da produção. Constata-se assim, uma inversão da tendência de crescimento da produção de RU em Portugal, situação que apenas se esperava que ocorresse em 2012, de acordo com o xdsPlano. No entanto, tratando-se apenas de um ano de decréscimo, não será para já possível prever se esta será uma tendência a manter. Na figura 1 pode observar-se essa evolução desde 2007 até ao ano de 2011.

Ano	2007	2008	2009	2010	2011
Produção RU (10 <sup>3</sup> t)	5.007	5.381	5.403	5.464	5.154
Evolução face ao ano anterior %	-	7,5 ↑	0,4 →	1,1 ↑	-5,7 ↓

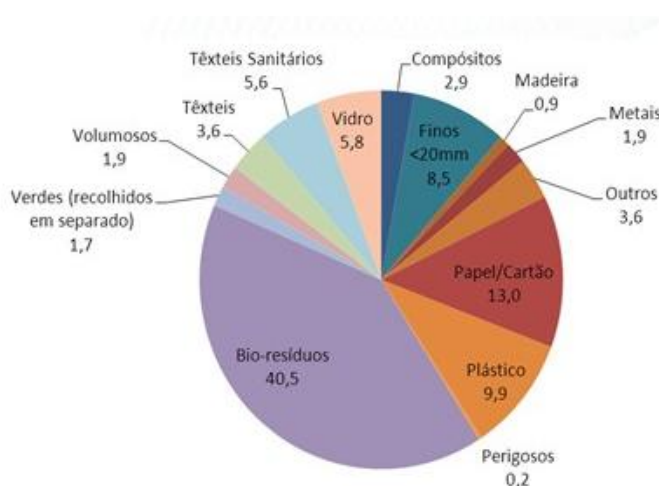
**Figura 1** - Evolução da Produção de RU ao longo dos anos (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013c).

Em relação às opções de gestão de RU, manteve-se a tendência dos anos anteriores, com 59% de deposição direta em aterro, 21% de incineração com recuperação de energia, 9% recolha seletiva de material, 9% valorização orgânica (recolha indiferenciada) e 2% para valorização orgânica (recolha seletiva). Neste âmbito há a salientar uma ligeira redução da fração depositada diretamente em aterro. Na figura 2, podemos ver a evolução desde 2007 até 2011.



**Figura 2 -** Evolução da gestão de resíduos desde 2007 a 2011 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013c).

Na figura 3, são apresentados os resultados da caracterização física dos RU produzidos no Continente (em %), realizada com base nas especificações técnicas da Portaria n.º 851/2009, de 7 de agosto.



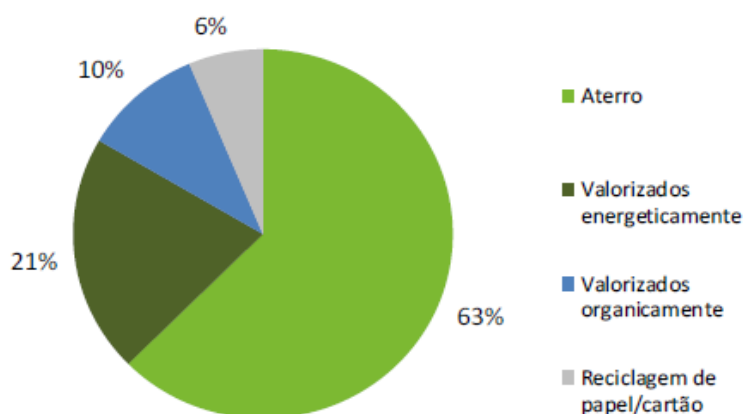
**Figura 3 -** Caracterização física de RU em % em Portugal (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013c).

A deposição em aterro continua a ser o destino preferencial dado aos resíduos urbanos (RU). Em 2011, 58% dos RU produzidos em Portugal continental foram encaminhados para aterro, o que corresponde a uma diminuição de cerca de 3% em relação ao ano precedente.

Os restantes RU produzidos em 2011, tiveram como destino a incineração com recuperação de energia (20%), a recolha seletiva com vista à reciclagem (14%) e a valorização orgânica – compostagem e digestão anaeróbia (9%). Verificou-se um aumento dos resíduos encaminhados para estes destinos de respetivamente 2%, 1% e

1%, relativamente a 2010. A recolha seletiva é a operação de gestão que mais tem aumentado nos últimos anos: no período em análise (2003-2011) os RU sujeitos a recolha seletiva aumentaram 9%.

Uma das metas existentes a nível nacional para os RU, estabelecida no Plano Estratégico para os Resíduos Sólidos Urbanos 2007-2016 (PERSU II), é a valorização dos resíduos urbanos biodegradáveis (RUB) através do desvio destes resíduos de aterro. Em 2011, do total de RU produzidos, cerca de 54% foram RUB (2.620 milhões de toneladas de resíduos). Destes, como se pode ver na figura 4, a maioria dos RUB (63%) foi encaminhada para aterro, 21% sofreu valorização energética, 10% foi valorizado organicamente e 6% dos RUB (papel e cartão) foram reciclados.



**Figura 4** - Destino final dos resíduos biodegradáveis em 2011 (Agência Portuguesa do Ambiente, 2013a)

Verifica-se pela análise da figura 3 e figura 4, que apenas 10% dos RUB são valorizados organicamente, sendo constituídos por Bio resíduos e de resíduos verdes, continuando a ir para aterro cerca de 63% dos resíduos. Segundo a Diretiva 1999/31 CE do conselho de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterro, os seus principais objetivos passam por prevenir ou reduzir os efeitos negativos sobre o ambiente resultantes da deposição de resíduos em aterro. Logo, deveriam ser aproveitados mais resíduos para valorização orgânica em vez de serem depositados em aterro.

### 3 PROCESSO DE COMPOSTAGEM

#### 3.1 BREVE HISTÓRIA DA COMPOSTAGEM

A compostagem é um processo que ocorre permanentemente na Natureza (Matos, 2009).

Segundo Haughes (1980) o primeiro método de compostagem surgiu em 1843 na América, por George Bommer ficando designado como *Bommer Method of Making Manurell*. Consistia em colocar resíduos da atividade agrícola numa grelha para decomposição, fazendo recircular as escorrências e lixiviados para cima da pilha por forma a acelerar o processo. Ao fim de 15 dias, já se considerava o produto resultante deste processo, com características adequadas para ser utilizado como corretivo orgânico dos solos (Cordeiro, 2010)

A partir desta data diversos cientistas centraram as suas atenções neste tema e colocaram-no em prática numa escala laboratorial, em sistemas fechados de forma a, poder controlar mais eficazmente tudo o que envolve estes processos diminuindo assim o tempo e os custos de operação, obtendo sempre um produto final satisfatório. Nos dias de hoje, a crescente preocupação com as questões ambientais e ecológicas e o incremento da legislação nesse sentido, torna a compostagem atrativa na solução para tratamento e valorização de um grande número de resíduos.

#### 3.2 DEFINIÇÃO DE COMPOSTAGEM

A compostagem, é um processo biológico realizado por um diversificado conjunto de organismos, essencialmente aeróbios que decorre a baixa temperatura (inferior a 75°C) durante o qual, a matéria orgânica é parcialmente mineralizada e humificada pelo oxigénio do ar e gases simples, com libertação de calor.

$$RU + ar = CO_2 + H_2O + N_2 + NH_3 + H_2S + COV's + inertes + \text{húmus} + \text{matéria viva} + \text{calor}$$
(Matos, 2008) Eq. 1

De acordo com a Portaria nº 15/96 de 23 de Janeiro, na alínea i) do nº3 define-se compostagem, como um “processo de reciclagem onde há degradação biológica aeróbia ou anaeróbia de resíduos orgânicos de modo a proceder à sua estabilização, produzindo

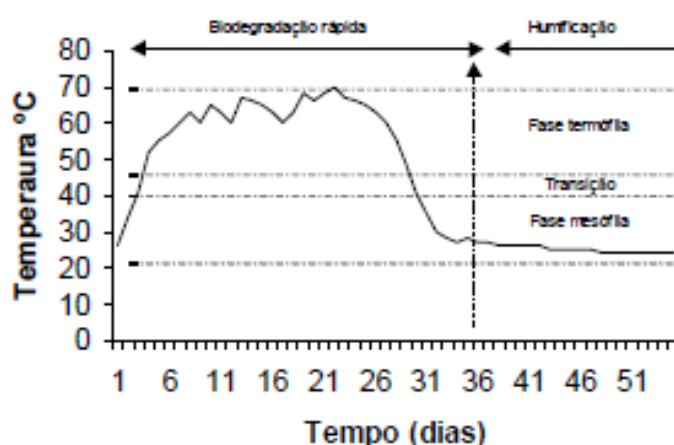
uma substância húmica, utilizável em algumas circunstâncias como condicionador do solo”.

Durante o processo de compostagem podem distinguir-se três fases, como se verifica pela figura 5, e que se dão consecutivamente: Hidrólise, Termólise e a Maturação (Matos, 2009)

**Fase hidrolítica** – Ocorre a hidrólise de macromoléculas através de enzimas extracelulares com formação de açúcares solúveis, aminoácidos e ácidos gordos. Este processo ocorre nos dois a três primeiros dias, a temperaturas próximas das ambiente e de forma facultativa em relação à presença de oxigénio.

**Fase termófila** – Ocorre a assimilação das formas solubilizadas, dando origem a um intenso fenómeno de metabolismo e crescimento biológico com formação de  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$  e libertação de calor. Esta fase deve desenrolar-se entre os 55 a 65°C, contudo pode atingir uma temperatura superior a 70°C. Tem a duração de alguns dias dependendo da temperatura.

**Fase de maturação** - Ocorre a degradação da matéria orgânica residual mais dura, começando pela celulose e terminando na lenhina. As perdas de calor excedem a energia que é gerada, havendo assim um decréscimo de temperatura ao longo do tempo. Esta fase dura cerca de um a dois meses.



**Figura 5** – Exemplo genérico das fases da temperatura durante o processo de compostagem (UniSant’ana,2013)

### **3.3 OBJETIVOS E APLICAÇÃO DA COMPOSTAGEM**

Os principais objetivos da compostagem são;

- Transformação dos materiais biodegradáveis orgânicos em materiais estáveis biologicamente que não sejam suscetíveis de evoluções biológicas repentinas
- Redução dos maus odores, redução do volume e da massa e da quantidade de resíduos a depositar em aterro
- Destruição de organismos indesejáveis, presentes nos resíduos sólidos, como patogênicos e sementes de plantas daninhas
- Desenvolvimento de um material rico em nutrientes, a usar como promotor do crescimento das plantas e corretor do solo, reduzindo o recurso ao uso de fertilizantes químicos, que ao contrário do composto, disponibilizam os nutrientes de forma quase instantânea (Santos, 2007)
- Pré-tratamento na valorização de materiais
- Estabilizadora de produtos resultantes da digestão anaeróbia de resíduos
- Pode ser usada como processo de secagem de composto

### **3.4 OS PARÂMETROS QUE AFETAM O PROCESSO DE COMPOSTAGEM**

O conjunto de fatores condicionantes para o desenvolvimento de um sistema biologicamente complexo como a compostagem deve ser limitado por uma série de parâmetros Biológicos, Químicos e Físicos sendo que, cada tipo de material a ser compostado exige uma combinação ótima de humidade, arejamento, relação C/N, pH e granulometria. Estes são os fatores que, direta ou indiretamente, afetam a atividade microbiológica durante a compostagem.

#### **Parâmetros Biológicos**

- Microrganismos

A transformação da matéria orgânica é resultante da ação combinada da macro e mesofauna (minhocas, formigas, besouros e ácaros) e de diferentes comunidades de microrganismos (incluindo bactérias, actinomicetes, leveduras e fungos) que predominam em diferentes fases da compostagem.



Os principais nutrientes que constituem os resíduos vegetais e animais, encontram-se na forma orgânica e são decompostos em diferentes estágios, com diferentes intensidades e por diferentes populações, como referido anteriormente. Segregam enzimas e digerem o seu alimento fora da célula (Primavesi, 1981).

Para que ocorra a digestão da matéria orgânica, os microrganismos libertam enzimas hidrolíticas, que vão hidrolisar os compostos de elevado peso molecular em formas solúveis, de baixo peso molecular, assimiláveis pelos microrganismos. Segue-se a fase de degradação dos compostos orgânicos, sendo necessária a presença de oxigénio nesta fase, para que a matéria orgânica anteriormente absorvida seja metabolizada, libertando  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e energia na forma de calor (Kiehl, 2004).

Em todo o processo de mineralização há um componente de imobilização, uma renovação da matéria orgânica e uma assimilação de nutrientes minerais, que promovem o crescimento e a manutenção da biomassa (Aquino et al., 2005). Porém, durante todo o processo ocorre a produção de calor, com desprendimento de  $\text{CO}_2$  e de vapor de água (Kiehl, 2004), estando estas características relacionadas ao metabolismo exotérmico dos microrganismos, à sua respiração e à evaporação de água, que é favorecida pelo aumento da temperatura gerada no interior da massa que se encontra em compostagem (Zucconi e Bertoldi, 1991)

### **Parâmetros Químicos**

Para manter a reprodução e assegurar as funções metabólicas, todos os organismos necessitam de uma quantidade mínima de todos os elementos (Gomes, 2001). É importante que no início do processo de compostagem estejam reunidas todas as condições fundamentais para que o processo decorra o mais natural possível. Assim os parâmetros químicos mais importantes neste processo são o pH e a razão ponderal C/N

- pH

De acordo com Jimenez e Garcia (1989), o pH durante as primeiras horas, decresce até valores aproximados de 5,0, e posteriormente aumenta, gradualmente de acordo com a evolução do processo de compostagem e a estabilização do composto, atingindo assim valores próximos dos 7,0 e 8,0, devido à degradação termófila. A quando do arrefecimento o pH baixa até cerca de 7.

A faixa considerada ótima para o desenvolvimento de microrganismos responsáveis pela compostagem situa-se entre os 5.5 e 8.5 devido à maioria das enzimas se encontrar ativa nesta faixa de pH (Rodrigues et al., 2006). Contudo Pereira Neto (2007) afirma que a

compostagem também pode ser desenvolvida numa escala que varia dos 4.5 aos 9.5 de pH, sendo que os valores extremos são regulados pelos microrganismos, por meio da degradação dos compostos que produzem subprodutos ácidos ou básicos, consoante a necessidade do meio.

O valor do pH afeta também a perda de azoto, uma vez que acima de pH 7 ocorre a libertação de  $\text{NH}_3$  de soluções de amónia aquosa. Assim, para operações de compostagem que necessitam de pH 8, não será possível reter azoto se  $\text{C/N} > 35$  (Matos, 2009)

- Relação C/N

Para manter o sistema biológico a funcionar em boas condições, o meio deve proporcionar, para além das fontes de carbono, energia e oxigénio, certos nutrientes como o azoto, fósforo entre outros.

A relação C/N, é muito utilizada para avaliar os níveis de maturação de substâncias orgânicas e verificar os seus efeitos no crescimento microbiológico, uma vez que, os microrganismos necessitam de C e de N como fonte de energia e para incorporar em nova biomassa celular.

A relação mássica C/N ótima para a compostagem foi estudada por vários autores. Segundo (Costa *et al.* 1991), os microrganismos requerem 20 partes de carbono por 1 de azoto (20/1), estando o ótimo entre 25 e 30. Para valores de C/N inferiores a 20 (maior conteúdo de N) ocorrem perdas de azoto na forma amoniacal, e para relações C/N superiores a 30, o processo torna-se lento. O carbono é importante uma vez que, para além de ser fonte de energia para a atividade dos microrganismos, representa cerca de metade da massa das células microbianas. Por seu lado, o azoto é essencial para os microrganismos se reproduzirem e sintetizarem as proteínas das novas células, as quais representam aproximadamente metade da biomassa microbiana (Brito, 2005). Assim, o intervalo ótimo para a relação C/N deve estar compreendido entre 25:1 e 30:1. Como refere (Cunha Queda 1999), se tivermos uma mistura com uma relação C/N elevada em que o carbono se encontre em excesso, o azoto em défice é o fator limitante. Pelo contrário, se a relação C/N for baixa, encontrando-se o azoto em excesso, o fator limitante será o carbono disponível. Apesar de a relação C/N ser um parâmetro útil na preparação das misturas dos resíduos orgânicos a compostar, também a disponibilidade do carbono deve ser tomada em consideração, já que a forma em que se encontra o carbono é muito importante e determina a sua utilização pelos microrganismos.

Cunha Queda, 1999, Cunha Queda *et al.* (2002) e Brito (2005) mencionam que esta relação poderá variar em função das características específicas dos materiais utilizados, designadamente com a disponibilidade do carbono desses materiais para o ataque microbiano. Apesar de quase todo o azoto orgânico estar disponível para ser utilizado pelos microrganismos, o mesmo não se verifica relativamente ao carbono de determinados materiais, por se encontrar em formas resistentes à degradação biológica. A relação C/N da mistura utilizada no processo tem de ser ajustada em função da disponibilidade de carbono e de azoto nos materiais.

### **Parâmetros Físicos**

Uma aplicação racional do processo de compostagem envolve o controlo dos parâmetros relacionados com a libertação de calor por ação microbiológica: humidade, arejamento e temperatura (Gomes, 2001).

- Humidade

O processo de compostagem decorre de forma favorável desde que o teor de humidade não desça a valores inferiores a 50%, pois nestes valores os processos biológicos têm tendência para se tornarem limitados por falta de água. Para valores de teor de humidade acima dos 60% dá-se a colmatação dos poros por presença de água líquida, dificultando assim o acesso do oxigénio. O valor considerado ótimo, corresponde ao material simplesmente húmido, com cerca de 55% de água.

Para além da humidade que acompanha o material, o desenvolvimento do processo forma grandes quantidades de água, que contribui para encharcar o material através dos espaços interparticulares, proporcionando condições para a fermentação anaeróbia, o que é indesejável.

Quando a humidade é excessiva o material tende a colmatar e ocorre a formação de uma purga, lixiviado, com elevada carga orgânica que necessita ser encaminhado para tratamento adequado. Este tratamento pode ser através de sistemas convencionais (lagoa de recirculação, tratamentos biológicos ou tratamentos físico-químicos) ou de sistemas alternativos e processos emergentes (evaporação/condensação, eletrocoagulação, tratamento combinado com águas residuais). Em alternativa, o lixiviado do processo pode ser armazenado em condições adequadas, para posterior reintrodução (recirculação), numa fase do processo deficitária em humidade. Normalmente, a energia calorífica deverá ser suficiente para permitir a evaporação da água gerada na reação,

contribuindo assim, para a manutenção das condições adequadas de humidade e de temperatura da pilha.

A correção do teor de humidade do material a compostar em caso de excesso é feita, através da adição de materiais secos, tais como, composto, serrim, cavacos, casca de pinheiro, entre outros. Ou então, secando o material; no caso contrário adiciona-se água.

No final o composto deve apresentar-se o mais desidratado possível (Matos, 2008)

- Temperatura

Este é um dos fatores de grande relevância no processo de compostagem, uma vez que está intimamente ligada com a atividade metabólica dos microrganismos, a qual é afetada diretamente pelo arejamento.

O calor é um dos produtos da oxidação microbiológica, e estando reunidas condições físicas próprias (pilha ou reator) ele é naturalmente aproveitado para elevar a temperatura do próprio substrato até à gama ótima da reação bioquímica. Desta forma, não é necessário uma fonte externa de energia na forma de calor.

Cada substrato tem uma gama considerada ótima de fermentação, abaixo da qual, a reação torna-se demasiado lenta e, acima da qual há esporulação e perda de diversidade microbiológica. As temperaturas relativamente altas também provocam a libertação desnecessária de odores indesejáveis.

A gama de temperatura para a maior parte dos substratos encontra-se entre 50 – 60°C. O nível de temperatura é importante não só pela questão da velocidade de reação de degradação, mas também, porque permite obter um produto final (composto) isento de risco para a saúde pública, já que a essas temperaturas se eliminam larvas, ovos de insectos e determinadas espécies de bactérias e fungos.

Pode afirmar-se que, os referidos organismos expostos durante cerca de 48h a uma temperatura  $\approx 50^{\circ}\text{C}$  é o requisito fundamental para se obter um produto final isento de agentes patogénicos.

Assim, para uma correta operação de compostagem é exigido um compromisso entre a velocidade de reação, redução de agentes patogénicos e produção de odores. Este objetivo consegue-se na grande maioria dos substratos, mantendo a temperatura na gama dos 50 – 60°C. De modo a estabilizar a temperatura nesta gama, o calor produzido por oxidação microbiológica tem de ser parcialmente removido. Essa remoção passa pelo arejamento controlado, removendo assim o calor em excesso não só pela convecção

forçada e/ou natural mas também pelo arrefecimento provocado pela evaporação da humidade do resíduo (Matos 2008)

- Arejamento

A presença de oxigénio é fundamental no processo de compostagem, de forma a evitar altos índices de temperatura, de aumentar a velocidade de oxidação (para que ocorra a produção de energia necessária aos microrganismos que realizam a decomposição), de diminuir a libertação de odores e reduzir o excesso de humidade do material em decomposição.

A quantidade de oxigénio irá indicar, se a compostagem é anaeróbia (com ausência de oxigénio) ou aeróbia (com presença de oxigénio). Na compostagem quando há disponibilidade de oxigénio livre, predominam os microrganismos aeróbios, sendo os agentes mais destacados os fungos e bactérias (Oliveira *et al*, 2008).

Este processo aeróbio é caracterizado pela elevada temperatura que ocorre durante a formação do composto, pelo baixo tempo necessário (como processo biológico) na degradação da matéria orgânica, graças às reações de oxidação e oxigenação que ocorrem, conduzindo o pH do meio a valores próximo de 7.0.

A compostagem aeróbia é a decomposição dos substratos orgânicos na presença de oxigénio, sendo que os principais produtos são o CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e energia. O arejamento dependendo do tamanho das pilhas, pode ser feito de duas maneiras, manual ou mecânico.

A compostagem anaeróbia passa pela decomposição dos substratos orgânicos na ausência de oxigénio, levando à libertação de maus cheiros devido à produção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, além de produtos intermediários, como ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

- Granulometria

O tamanho das partículas tem importância na oxigenação da massa em compostagem. Sendo demasiado finas, <2 mm, o arejamento é mais difícil, enquanto acima de 16 mm o arejamento natural é facilitado, sem revolvimentos frequentes. Por outro lado, quanto menor forem as partículas, maior será a área de ataque pelos microrganismos, contudo, revolvimentos frequentes potenciam a libertação de calor e o arrefecimento do material. Deste modo, deve procurar-se um compromisso entre necessidades de revolvimento para incorporação de ar dos espaços vazios da matriz orgânica e a granulometria. Uma forma de ultrapassar este dilema, consiste na adição dum agente estruturante ao material

para compostagem, criando macroporos para as trocas gasosas, mas mantendo uma baixa granulometria.

Para compostagem de resíduos orgânicos de origem urbana, a granulometria recomendada é de 20 até 50 mm, por facilitar a oxigenação ao formar uma massa porosa por onde passa o ar rico em oxigênio. Deste modo, a granulometria influi em diversos parâmetros da compostagem designadamente a oxigenação, a humidade e a temperatura (Russo, 2003).

### 3.5 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DO PROCESSO DE COMPOSTAGEM

A compostagem pode constituir um processo de tratamento dos resíduos sólidos, integrado num sistema de reciclagem de materiais ou como único sistema de tratamento da fração orgânica dos resíduos (Russo, 2003). Na Tabela 2 São apresentadas algumas das vantagens e limitações ao processo de degradação biológica, bem como a sua aplicação em solos.

**Tabela 2** - Vantagens e limitações no processo de degradação biológica (Matos, 2008; Cordeiro, 2010)

Vantagens	Limitações
Redução da quantidade dos resíduos destinados a aterro	Necessidade de maior área de terreno disponível do que no caso de outros processos de tratamento
Melhoria da reciclabilidade dos outros materiais, uma vez que se apresentam menos contaminados	Necessidades de realizar uma prévia triagem do material para que não estejam presentes produtos de decomposição lenta e que contenham metais pesados
Redução da formação de lixiviados líquidos e purgas gasosas em aterros, que necessitam de tratamento	Monitorização cuidada ao longo do processo para que não ocorra a formação de maus cheiros nem perda excessiva de humidade do material
Recuperação de nutrientes (Azoto, Fósforo e Potássio) e micronutrientes (Zn, Mg, Ca, Fe entre outros) das plantas	Exigência de mais trabalho e consequentemente de mais mão-de-obra (o que pode traduzir-se em último caso até numa vantagem parcial já que a mão-de-obra pode ser pouco especializada sendo assim um impacto social positivo)
Recuperação de matéria orgânica em formato	-

humificado com elevado poder tampão e grande capacidade de troca iónica, permitindo desenvolver e manter uma estrutura de solo que facilita o arejamento das raízes	
---	--

### 3.6 O COMPOSTO

O composto é resultado de um processo de compostagem, onde se obtém no final um produto, estabilizado que quando aplicado ao solo possui características que podem ser vantajosas, dando-se mesmo o nome de condicionador de solo.

#### 3.6.1 VANTAGENS VERSUS LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO DO COMPOSTO NO SOLO

No Tabela 3 são apresentadas algumas das vantagens e das limitações da aplicação do composto no solo.

**Tabela 3** - Vantagens versus Limitações da aplicação do composto no solo (Matos,2088; Felícia, 2009)

Vantagens	Limitações
A estrutura do solo, através da adição de materiais orgânicos, a porosidade de solos arenosos não necessita de ser incrementada	A aplicação de compostos não maturados nos solos causa sérios danos aos sistemas radiculares das plantas, devido à elevada razão ponderal C/N e à volatilização de amoníaco
Aumenta a capacidade de retenção de água e de nutrientes, azoto, fósforo e potássio, em solos arenosos devido à porosidade elevada	Efeito inibidor do crescimento vegetal causado pela presença de ácidos gordos de baixo peso molecular, sobretudo ácido propiónico e ácido butírico e ainda elevado teor em sais, acrescido de fitotoxinas de origem fenólica
Melhora o arejamento, reduz a erosão	Falta de qualidade do composto para ser aplicado no solo
Diminui a ocorrência de determinadas pragas das plantas	Contaminação do composto com plásticos, metais, vidros e patogénicos
Aumenta a infiltração, reduz a formação de gás metano que contribui para o aquecimento	Carga orgânica

global,	
Elimina os excessos de fertilizantes inorgânicos que acabam por contaminar os lençóis de água	-

### 3.6.2 RÓTULO ECOLÓGICO

Em termos regulamentares qualidade do composto, tem de obedecer a diversos documentos, como seja a Decisão da Comissão de 2006/799/CE de 3 de Novembro de 2006, como à proposta de Norma Técnica sobre Qualidade e Utilizações do composto de 26 de Abril de 2004.

A Decisão da Comissão de 2006/7999/CE de 3 de Novembro de 2006 estabelece os critérios ecológicos para a atribuição do rótulo ecológico comunitário aos corretivos de solo e aos suportes de cultura.

Segundo esta Decisão um corretivo de solo, “inclui materiais adicionados ao solo no local para, principalmente, manter ou melhorar as suas propriedades físicas e que são suscetíveis de melhorar as suas propriedades ou atividade químicas e/ou biológicas”

Na tabela 4, encontram-se os critérios ecológicos que o corretivo de solo deve obedecer. Esses critérios destinam-se a promover a utilização de materiais renováveis e/ou a reciclagem da matéria orgânica derivada da recolha e/ou transformação de resíduos, contribuindo para a minimização dos resíduos sólidos destinados a eliminação final, bem como à redução dos danos e riscos ambientais decorrentes de metais pesados e outros materiais perigosos, relacionados com a aplicação do produto

**Tabela 4 - Critérios para a atribuição do Rótulo Ecológico**

Parâmetro	Requisitos
Ingredientes	<p>Não pode conter turfa</p> <p>O Teor em matéria orgânica deve decorrer da transformação e/ou reutilização de resíduos</p> <p>Pode conter lamas de depuração desde que provenham de uma só fonte e cumpram todos os critérios a seguir descritos, nomeadamente o teor em metais pesados</p> <p>Só pode conter minerais que não tenham sido extraídos de sítios notificados de importância comunitária nem de rede Natura 2000</p>
Substâncias perigosas [mg.kg <sup>-1</sup> ]	<p>Zn:300; Cu:100; Ni:50; Cd:1; Pb:100; Hg:1; Cr:100; Mo*:2; Se*:1,5; As*:10; F*:200</p> <p>*Apenas são necessários dados com a presença destes elementos se os produtos</p>



	contiverem materiais provenientes de processos industriais
Contaminantes Físicos	Granulometria de 2mm Teor em vidro, metal e plástico inferior a 0,5% em relação à matéria seca
Azoto	Concentração máxima de 3% em massa e N inorgânico até 20% do N total
Comportamento do produto	Fornecido sob a forma sólida e conter no mínimo 25% de massa seca e 20% de matéria orgânica em relação à massa seca Não podem ter efeitos negativos na germinação das plantas ou no seu crescimento posterior
Saúde e Segurança	Não podem exceder os níveis máximos de agentes patogénicos primários: Salmonella: ausentes em 25g Ovos de helmintas: ausentes em 1,5g <i>Escherichia Coli</i> (E. Coli): <100NMP.g <sup>-1</sup> (NMP: número mais provável)
Sementes e Propágulos	O conteúdo de sementes de infestantes ou de partes de infestantes agressivas capazes de reprodução vegetativa não pode exceder 2 unidades por litro
Informações fornecidas com o produto	Nome e endereço da entidade responsável pela colocação do produto no mercado Descriptor que identifique o tipo do produto e que inclua a designação “corretivo de solos” Código de identificação do lote Quantidade (em massa ou volume) Indicação das principais matérias (que excedam 5% do volume) utilizadas no fabrico do produto Condições de armazenamento e data-limite de utilização recomendadas Instruções para um manuseamento e utilização seguros pH e razão ponderal C/N Métodos de utilização recomendados Em aplicações não profissionais; dose de aplicação recomendada, expressa em quilogramas ou litros de produto por unidade de superfície (m <sup>2</sup> ) por ano

No processo de compostagem, o que se pretende é que o composto seja utilizado como fertilizante na agricultura. Segundo a proposta de Norma Técnica sobre a qualidade e utilização do composto para utilização na agricultura, de Outubro de 2001 podemos dizer que podem ser ainda alvo deste processo biológico os resíduos que se encontram descritos na tabela 5 com referência ao respetivo código LER (Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto, 2006)

**Tabela 5** - Listagem dos Resíduos que podem ser utilizados para a produção de Composto

Código LER	Tipo de resíduo
02	RESÍDUOS DA AGRICULTURA, HORTICULTURA, AQUACULTURA, SILVICULTURA,

	CAÇA E PESCA, E DA PREPARAÇÃO E PROCESSAMENTO DE PRODUTOS ALIMENTARES
02 01	Resíduo da agricultura, horticultura, aquacultura, silvicultura, caça e pesca
02 02	Resíduos da preparação e processamento de carne, peixe e outros produtos alimentares de origem animal
03 03	Resíduos da preparação e processamento de frutos, legumes, cereais, óleos alimentares, cacau, café, chá e tabaco; resíduos da produção de conservas; resíduos da produção de levedura e extrato de levedura, e da preparação e fermentação de melaços
02 04	Resíduos do processamento de açúcar
02 05	Resíduos da indústria de lacticínios
02 06	Resíduos da indústria de panificação, pastelaria e confeitaria
02 07	Resíduos da produção de bebidas alcoólicas e não alcoólicas (excluindo café, chá e cacau)
03	RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE MADEIRA E DO FABRICO DE PAINÉIS, MOBILIÁRIO, PASTA PARA PAPEL, PAPEL E CARTÃO
03 01	Resíduos do processamento de madeira e fabrico de painéis e mobiliário
03 03	Resíduos da produção e da transformação de pasta para papel, papel e cartão
04	RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DO COURO E PRODUTOS DE COURO E DA INDÚSTRIA TÊXTIL
04 01	Resíduos da indústria do couro e produtos de couro
04 02	Resíduos da indústria têxtil
15	RESÍDUOS DE EMBALAGENS, ABSORVENTES, PANOS DE LIMPEZA, MATERIAIS FILTRANTES E VESTUÁRIO DE PROTECÇÃO NÃO ANTERIORMENTE ESPECIFICADOS
15 01	Embalagens (incluindo resíduos urbanos e equiparados de embalagens, recolhidos separadamente)
19	RESÍDUOS DE INSTALAÇÕES DE GESTÃO DE RESÍDUOS, DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS E DA PREPARAÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO E ÁGUA PARA CONSUMO INDUSTRIAL
19 06	Resíduos do tratamento anaeróbio de resíduos
19 08	Resíduos de estações de tratamento de águas residuais não anteriormente especificados
20	RESÍDUOS URBANOS E EQUIPARADOS (RESÍDUOS DOMÉSTICOS, DO COMÉRCIO, INDÚSTRIA E SERVIÇOS), INCLUINDO AS FRACÇÕES RECOLHIDAS SELECTIVAMENTE
20 01	Fracções recolhidas seletivamente (exceto 15 01)
20 02	Resíduos de jardins e parques (incluindo cemitérios)

20 03	Outros resíduos urbanos e equiparados
-------	---------------------------------------

## **4 FUNDAMENTOS DA MODELAÇÃO**

### **4.1 MODELAÇÃO**

Como já foi referido anteriormente a compostagem é um processo biológico, durante o qual frações de substratos orgânicos são decompostos por microrganismos (bactérias e fungos) dando origem a dióxido de carbono, água e a uma fase sólida (o composto), com libertação de calor (Gomes, 2008).

Este processo envolve vários fenómenos químicos, biológicos e físicos que são influenciados por fenómenos de ordem operacional, estabelecendo um sistema heterogéneo bastante complexo. Assim, para se compreender melhor os mecanismos envolvidos no processo de compostagem, e a fim de obter um correto dimensionamento e otimização melhorada dos sistemas reativos, têm vindo a desenvolver-se modelos matemáticos de acordo com diferentes abordagens e graus de complexidade (Gomes, 2008).

Desde 1976 que, na literatura têm aparecido modelos matemáticos com mais de 30 trabalhos contemplando este tema (Mason, 2006).

A modelação analítica e numérica de um processo pode ser usada como uma ferramenta para avaliar o desempenho do sistema nas diversas fases do seu funcionamento. Este é um pré-requisito para controlar o processo (Xi, 2005).

A modelação matemática tem sido amplamente utilizada na ciência e na engenharia, com o objetivo de melhorar a compreensão do comportamento dos sistemas de modo a explorar novos conceitos teóricos, para prever o desempenho dos mesmos. De referir que em muitos casos, estes modelos ajudam a resolver muitos problemas de design prático, uma vez que oferecem potencial para reduzir, ou até mesmo substituir, a necessidade de experimentar fisicamente um novo material e / ou operação do processo.

Uma vez que, os custos associados a estes processos são bastante elevados, a realização de investigação torna-se numa vantagem (Mason, 2006).

Assim, existem diferentes abordagens, umas de carácter mais prático outras de carácter mais teórico, dependendo dos vários objetivos que se pretendem alcançar, os vários autores centram os seus trabalhos no sistema biológico ou nos processos de transferência de massa de calor.

## 4.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De forma mais ampla, a resolução de equações provenientes do balanço mássico e energia estabelecido numa dado intervalo de tempo, serviram de base para a maioria dos modelos no processo de compostagem. Para isso é usada a seguinte fórmula geral:

$$\text{Acumulação} = \text{entradas} - \text{saídas} \pm \text{transformações} \quad \text{Eq. 2}$$

Na Figura 6 são indicados alguns dos modelos determinísticos, contudo com o passar dos anos também surgiram alguns modelos com elementos estocásticos (Seki, 2000; Scholwin and Bidlingmaier, 2003).

“Alguns investigadores têm olhado para o sistema de compostagem à macroescala, ou seja, olham para o sistema como um todo, enquanto outros abordam o tema sobre o ponto de vista microbiológico (Kaiser, 1996; Stombaugh and Nokes, 1996, Seki, 2000). Sob uma perspetiva diferente, Hamelers, 1993 nos seus processos de modelização utiliza a partícula de compostagem como base da sua análise”, citado por Mason (2006).

Verifica-se que muitos autores abordam os reatores como sendo, completos, distribuídos por camadas horizontais, por elementos de formas retangulares ou triangulares ou por regiões com base na temperatura homogeneizada (Mason 2006).

“O modelo de Haug, (1993), serviu como base de vários estudos seguidos por Bertoni et al. (1997); Kim et al (2000) e Ndegwa et al. (2000) e ao mesmo tempo Das and Keener, (1997) e Mohee et al. (1997) usaram alguns elementos já definidos no modelo anteriormente proposto por Keener et al. (1993). O modelo Vandergheynst et al. (1997) foi ainda mais composto por Higgins and Walker (2001)”, citado por Mason (2006).

References	Deterministic	Stochastic	Parameters		Terms in energy balance (see Table 2 for key)	Comments
			Lumped	Distributed		
Finger et al. (1976)	Y	–	–	Y	1, 8 <sup>a</sup> , 11	<sup>a</sup> Thermal diffusion only
Smith and Eilers (1980)	Y	–	–	Y	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11	Radiation input only
Bach et al. (1987)	Y	–	na	na	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	Heat balance only
Kishimoto et al. (1987)	Y	–	Y	–	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
Nakasaki et al. (1987)	Y	–	Y	–	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
Hamelers (1993)	Y	–	Y	–	none	–
Haug (1993)	Y	–	Y	–	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
Keener et al. (1993)	Y	–	–	Y	1, 2, 3, 6, 7, 10, 11	No conduction or radiation losses
van Lier et al. (1994)	Y	–	–	Y	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
Kaiser (1996)	Y	–	–	Y	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
Stombaugh and Nokes (1996)	Y	–	–	Y	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	Conduction constant
Das and Keener (1997)	Y	–	–	Y	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
VanderGheynst et al. (1997)	Y	–	Y	–	1, 2, 3, 6, 7, 10, 11	No radial conduction
Mohee et al. (1998)	Y	–	Y	–	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
Seki (2000)	Y	Y	Y	–	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–
Higgins and Walker (2001)	Y	–	Y	–	1, 2, 3, 6, 7, 10, 11	No radial conduction
Robinson et al. (2000)	Y	–	na	na	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	Radiation included; heat balance only
Scholwin and Bidlingmaier (2003)	Y	Y	–	Y	1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11	–

**Figura 6** - Apresentação geral dos modelos de compostagem (Mason, 2006)

A modelação mais importante do processo de compostagem passa pela fase de degradação do substrato, para se poder obter previsões da temperatura, humidade e de outros parâmetros associados ao processo (Mason 2008).

“A abordagem mais comum e mais usada, é a utilização de modelos de degradação de substratos, usando cinéticas de primeira ordem onde a variável independente é a quantidade, ou a concentração de substrato remanescente (Smith and Eilers, 1980; Haug, 1993; Keener et al., 1993; Das and Keener, 1997; Mohee et al., 1998; higgins and Walker, 2001; Scholwin and Bidlingmaier, 2003; Komilis, 2006) ou a quantidade ou concentração de biomassa presente (Kaiser, 1996; Stombaugh and Nokes, 1996; Seki, 2000)”, citado por Mason (2006).

Quando o substrato é expresso na forma de massa (kg) de sólidos voláteis biodegradáveis, SVB, e a quantidade de biomassa celular bacteriana pela massa (kg), X, a taxa de variação de SVB (kg SVB degradados por dia) é dada pela Eq. 3 e a taxa de variação de biomassa celular (kg X por dia) pela Eq. 4.

A velocidade de degradação de SVB (Eq. 3) rege-se por uma cinética de primeira ordem, relativamente à massa (kg) de SVB presentes, sendo  $k$  ( $\text{dia}^{-1}$ ) a constante cinética. A variação de X (Eq. 4) é dada pela velocidade de crescimento microbiológico,  $\mu \cdot X$  ( $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$ ), menos a taxa de decaimento microbiológico,  $k_d \cdot X$  ( $\text{kg} \cdot \text{dia}^{-1}$ ).

$$\frac{dSVB}{dt} = -k SVB$$

Eq. 3

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - K_d X$$

Eq. 4

É de notar que, a cinética de primeira ordem é a forma mais vulgar de descrição de um processo de compostagem como se pode observar na Figura 7. A cinética de Monod ou do tipo de Monod, para o crescimento microbiológico, tem sido adotada de forma expressiva, contudo acarreta um problema a nível de resolução uma vez que são exigidos parâmetros relacionados ao crescimento microbiano e uma estimativa do valor da massa inicial de microrganismos. A análise e a revisão elaborada por Mason (2006), permitiu concluir que os modelos de primeira ordem são mais bem sucedidos que os modelos do tipo Monod, uma vez que estes preveem de forma mais exata os perfis de temperatura.

A cinética de primeira ordem proporciona uma boa descrição de vários processos biológicos de oxidação (Haug, 1993).

Um outro grupo de modelos existente são os modelos empíricos (Mason 2006). O modelo de Gompertz, de forma sigmóide, tem sido amplamente aplicado para descrever o crescimento de culturas puras a temperatura constante e recentemente foi aplicado para descrever a evolução de dióxido de carbono na compostagem Ghang et al., 2006.

Primeira Ordem	Monod ou tipo Monod (inclui Contois)	Tipo Gompertz	Outros
Haug, 1993	Whang & Meenaghan, 1980	Silveira, 1999	Paredes <i>et al.</i> , 2002 (zero-order)
Keener <i>et al.</i> , 1993, 1995, 1997, 2003, 2005	Kaiser, 1996	Chang <i>et al.</i> , 2005, 2006a	Briski <i>et al.</i> , 2007 (n-th order)
Van Lier <i>et al.</i> , 1994	Stombaugh & Nokes, 1996	Mason, 2008a, 2008b	Gomes & Pereira, 2008 (pseudo-first-order)
Das & Keener, 1996, 1997	Agamuthu <i>et al.</i> , 2000		Petric & Selimbasic, 2008 (2.89 order)
Adani <i>et al.</i> , 1997, 2001	Huang <i>et al.</i> , 2000		
Bertoni <i>et al.</i> , 1997	Seki, 2000		
Hamoda <i>et al.</i> , 1998	de Guardia <i>et al.</i> , 2001		
Mohee <i>et al.</i> , 1998	Hamelers, 2004		
Tollner <i>et al.</i> , 1998	Zavala <i>et al.</i> , 2004a, 2004b		
Koenig & Bari, 1999	Tremier <i>et al.</i> , 2005		
Shin <i>et al.</i> , 1999	Xi <i>et al.</i> , 2005, 2008		
Robinson <i>et al.</i> , 2000	Yamada & Kawase, 2006		
Bari & Koenig, 2000	Qin <i>et al.</i> , 2007		
Bari <i>et al.</i> , 2000	Sole-Mauri <i>et al.</i> , 2007		
Eklind & Kirchmann, 2000	Bongochgetsakul & Ishida, 2008		
Kim <i>et al.</i> , 2000	Bueno <i>et al.</i> , 2008		
Lasaridi <i>et al.</i> , 2000	Lin <i>et al.</i> , 2008a, 2008b		
Ndegwa <i>et al.</i> , 2000			
Paredes <i>et al.</i> , 2000, 2001, 2002			
Beck-Friis <i>et al.</i> , 2001			
Higgins & Walker, 2001			
Ekinci <i>et al.</i> , 2002, 2004, 2006			
Li <i>et al.</i> , 2002			
Nakasaki & Ohtaki, 2002			
Cronjé <i>et al.</i> , 2004			
Komilis, 2006			
Ramirez-Perez <i>et al.</i> , 2007			
de Guardia <i>et al.</i> , 2008			
Mason, 2008a, 2008b, 2009			
Tosun <i>et al.</i> , 2008			
Yu <i>et al.</i> , 2009			
43	20	5	4

**Figura 7** - Lista de estudos encontrados na literatura sobre os diferentes modelos utilizados por diferentes autores. A última linha refere-se ao número total de estudos referidos em cada coluna (Baptista, 2009).



## **5 ENSAIOS LABORATORIAIS DE COMPOSTAGEM**

### **5.1 OBJETIVOS**

De seguida são apresentados o objetivo, geral e específico, que estão por detrás deste estudo.

#### *5.1.1 OBJETIVO GERAL*

O trabalho realizado serviu para avaliar através de uma instalação de compostagem, controlada, qual o grau de degradação que se atinge para misturas dos materiais a compostar (casca de batata, casca de arroz e relva).

#### *5.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

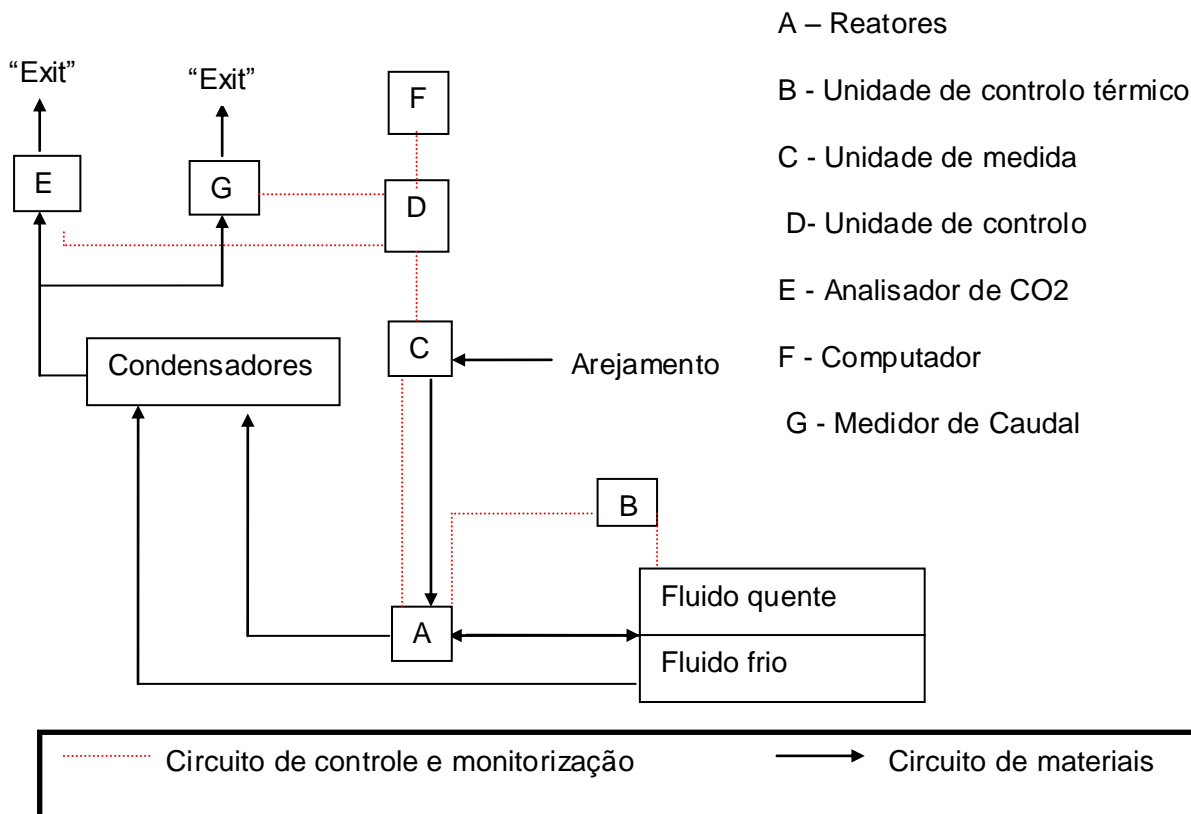
O trabalho realizado consistiu na averiguação da degradação por compostagem de uma mistura de resíduo orgânico da indústria agroalimentar em condições controladas, tendo por base;

- Operando a diferentes temperaturas (70°C, 50°C, 40°C e 30°C) e esclarecer o seu efeito na degradação do substrato
- Avaliar o grau de conversão, a humidade, sólidos voláteis e pH
- Testar duas razões de mistura dos componentes orgânicos.

### **5.2 INSTALAÇÃO LABORATORIAL**

Todos os sistemas laboratoriais têm como base a operação de reatores, uns de maior, outros de menor dimensão, mas em todos eles, a quantidade de substrato que comportam não é suficiente para conservar a energia calorífica gerada e que se perde por condução para o ambiente, devido a uma excessiva área de transferência de calor por unidade de volume. Assim, em todas as montagens laboratoriais, os reatores estão rodeados por material isolante ou imerso num banho termostatzado (Gomes, 2001).

A instalação utilizada nesta operação, é composta por 6 unidades principais interligadas entre si, como se pode esquematiza na figura 8;



**Figura 8 -** Representação esquemática da instalação laboratorial

O centro da instalação é um conjunto de quatro reatores independentes entre si (A) colocados em paralelo como se pode observar na figura 9.

Os reatores foram construídos em aço-inox 316 com parede dupla, são cilíndricos apresentando um volume vazio de 300 mm de altura por 140 mm de diâmetro, e possuem tampa em vidro acrílico de 30 mm de espessura onde foram acopladas as sondas de temperatura e a entrada e saída da ventilação. A parede dupla dos reatores permite a existência de uma bainha com uma espessura de 3mm, onde circula um fluido quente ou frio, funcionando como permutador de calor. Na base dos reatores existe um orifício com válvula, que quando aberta permite a retirada de lixiviados. O volume útil de cada reator está confinado a um cesto em malha de aço, que serve de suporte à massa de sólidos (3,53 dm<sup>3</sup>) (Gomes, 2001).



**Figura 9** - Vista frontal dos quatro reatores de compostagem da instalação

Existe necessidade de um controlo térmico, para a manutenção da temperatura desejada. Para isso cada reator tinha inserida no seu centro uma sonda Pt100 ligada a um controlador de temperatura, figura 10. A temperatura desejada é marcada no controlador digital de modo a que o processo decorresse sempre à mesma temperatura, com pouca oscilação, pois uma vez que houvesse uma variação, o sistema de válvulas existente neste mecanismo fazia com que houvesse admissão de fluido quente ou frio, nas bainhas dos reatores de modo a promover o aumento ou o arrefecimento do reator até poder fixar à temperatura previamente selecionada.



**Figura 10** - Unidade de controlo térmico da instalação

Os reatores encontram-se também ligados a uma unidade de medida, Figura 11. Esta unidade é constituída por 4 rotâmetros, munidos com 4 válvulas de agulha, um medidor de fluxo máximo e 17 válvulas eletromagnéticas de três vias, cujos objetivos são, gerir as

correntes gasosas de admissão e de exaustão dos reatores. Assim o ar é encaminhado tanto para o caudalímetro como para o medidor de CO<sub>2</sub>. Este processo tanto pode ser feito por via manual como por via automática (ligado á unidade de controlo D).



**Figura 11** - Unidade de medida da instalação

A unidade de controlo que se visualiza na Figura 12 é a peça principal de todo o mecanismo, pois estabelece o contato entre as placas, sendo constituído por;

Interface de multiplexagem, específica da aplicação;

Duas placas PCLD 786 de SSR's e relay's, para comando das electroválvulas;

Uma placa PCLD 889 com circuito de junção fria, para ligação a termopares;

Ramificação para o computador, através duma placa de aquisição nele instalada, PCL 818, que converte os sinais analógicos em digitais.



**Figura 12** - Unidade de controlo da instalação

O analisador de CO<sub>2</sub> que se encontra na Figura 13 é uma unidade periférica (Vaisala) e pode medir concentrações de CO<sub>2</sub> até 20%. O analisador é apropriado para bio-reactores e funciona por análise de fluxo. O sinal é devolvido de modo analógico em voltagem (Gomes, 2001)



**Figura 13** - Analisador de CO<sub>2</sub> Vaisala GMM111 Compact

O armazenamento de dados de toda a instalação, é feita através de um computador Figura 14, com um programa desenhado especificamente para esta instalação, em linguagem “turbo-C”, com o qual se pode interagir através de comandos simples num editor de texto (Gomes, 2001)



**Figura 14** - Computador associado à instalação

### 5.3 METODOLOGIA

Os ensaios experimentais realizados neste estudo, foram realizados com duas misturas dos mesmos componentes, casca de batata, casca de arroz e relva, mas em proporções diferentes como se indica na tabela 6. Conforme foi referido na secção 1.3, estas misturas foram previamente preparadas por outra equipa de investigação, que já estudou o parâmetro composição de mistura, no âmbito de uma tese de doutoramento.

**Tabela 6** – Composição, em base seca, das misturas usadas no estudo

Composição	RH <sub>1</sub>	RH <sub>4</sub>
Casca de batata	74,0 %	50,6 %
Relva	8,3 %	32,4 %
Casca de arroz	17,7 %	17,0 %

Na tabela 7 apresenta-se as condições definidas para as experiências realizadas em dois ensaios laboratoriais. Os processos decorreram em modo isotérmico.

**Tabela 7** - Condições operacionais dos ensaios experimentais

	Ensaio 1				Ensaio 2			
Mistura	RH <sub>1</sub>				RH <sub>4</sub>			
Reator	A1	B1	C1	D1	A2	B2	C2	D2
Temperatura (°C)	70	50	40	30	70	50	40	30

### 5.3.1 PLANO EXPERIMENTAL

Em ambos os ensaios, dois reatores operaram numa temperatura da gama termófila, 70°C e 60°C. A escolha justifica-se pelo fato de “Jing-Chung et al (2007) terem verificado que nessa gama ocorre o máximo da compostagem termófila. Considerando os estudos de Nakasaki et al (1985) essa temperatura representa uma temperatura em que é possível encontrar um equilíbrio entre o número de células viáveis, a taxa de produção de CO<sub>2</sub> e o grau de conversão. Na gama mesófila a taxa cumulativa de consumo de O<sub>2</sub>, aproxima-se do valor máximo aos 43°C.” Citado por Marques (2008).

Inicialmente encheu-se cada reator com a massa pré-estabelecida, ver tabela 6. Foram feitas análises prévias para saber o teor de humidade, pH, teor em sólidos voláteis, cinzas, azoto kjeldahl e lenhina Klason de forma a caracterizar a amostra inicial.

Com intervalos de uma semana os reatores eram abertos de forma a se fazer o revolvimento da sua massa. Era retirado o lixiviado e o condensado, anotando o seu

volume bem como o seu pH e eram retiradas pequenas amostras para se proceder a análises intermédias de humidade, sólidos voláteis e pH. Cada ensaio demorou cerca de quatro semanas.

Em relação ao material degradado final obtido a partir do processo em causa, fizeram-se as mesmas análises que se fizeram na amostra inicial. Por forma a se observarem as diferenças.

### 5.3.2 *MONITORIZAÇÃO DA FASE GASOSA*

Os valores dos caudais foram monitorizados ao longo do processo através de um medidor de fluxo máxico, (de marca Alborg) na escala de 0 a 2 dm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>, nas condições PTN, sendo medida a concentração de CO<sub>2</sub>, à entrada e à saída de cada reator, em intervalos de 6h através do medidor por IV da Vaisalla na escala de 0 a 20%, ver figura 11.

### 5.3.3 *ANÁLISE DA FASE SÓLIDA*

Para se proceder à amostragem da fase sólida, foi necessário recorrer à abertura dos reatores. Este processo implicou que fosse interrompido o processo baixando a temperatura do sistema, para valores próximos dos da temperatura ambiente.

Depois de abertos os reatores, os cestos foram pesados e o seu conteúdo era vertido para um recipiente onde era feito um remeximento manual da mistura, para que esta se torne um pouco mais homogénea. Posteriormente eram retiradas pequenas quantidades de amostra. Após esse passo, a mistura era recolocada dentro do cesto e este pesado antes de ir para o reator. As amostras intermédias retiradas foram secas a 40°C e moídas para posteriores análises de sólidos voláteis, humidade. No final dos ensaios foi realizado o mesmo procedimento, mas efetuou-se adicionalmente a determinação de lenhina e azoto kjeldhal.

No Tabela 8 são apresentados os parâmetros e as técnicas usadas ao longo dos ensaios.

**Tabela 8 - Parâmetros e técnicas de análise da fase sólida**

Parâmetro	Método de análise	Norma
Massa total	Pesagem em balança digital ( $\pm 0,01g$ )	
Humidade, $W_{wh}$	Secagem do material na estufa a $40^\circ$ durante 24h, seguida de moagem a 1 mm e depois a $105^\circ$ durante 2h. Secagem do material tal e qual a $105^\circ$ durante 2h. (3 réplicas para cada amostragem)	ISO 11465 - Soil quality - Determination of dry matter and water content on a mass basis - Gravimetric method (exceto no tempo 2H)
Sólidos Voláteis, $W_{SVR}$	Incineração do material a $600^\circ$ durante 2h (3 réplicas de cada amostragem)	Protocolo D 112-84 do "Standard Methods for Ash in Wood)
pH	Mistura de 25g de amostra em base tal e qual em 2,5 L de água destilada. Após 30 min de agitação procede-se à análise do sobrenadante por potenciometria com eletrodo de vidro	ISO 10390 - Soil quality — Determination of pH
Azoto Kjeldhal	Digestão ácida e destilação em meio alcalino de 1g de amostra seca e moída (1mm) (3 réplicas por cada reator) $N[\%] = \frac{(A - B) * N * 14,007}{C} * 100$ A – Volume de HCL, em mL gasto na titulação da amostra B – Volume de HCL, em mL na titulação de branco C - Massa de amostra, em grama, em base seca N – Normalidade do HCL	Nota de Aplicação 300 versão nº8 Fevereiro de 2009
Lenhina de Klason	- Adicionar a copos contendo as amostras ( $\approx 0,800g$ ), 15,0 mL de ácido sulfúrico a 72% - Manter o copo em banho-maria a $20 \pm 1^\circ C$ , tapado com vidro de relógio, durante 2h, agitando frequentemente para digerir as fibras- Adicionar cerca de 300 a 400 mL de água num erlenmyer e transferir todo o material para o erlenmyer - Lavar bem e diluir a amostra do copo contendo 3% de ácido sulfúrico, até um volume total de 575 mL - Ferver a solução durante 4h, mantendo o volume constante, através da adição frequente de água quente - Deixar o material insolúvel sedimentar - Pesar cadinhos filtrantes, previamente calcinados, - filtrar o sedimentado e levar à estufa a $105^\circ C$ a secar durante 2h. - Colocar num excicador até arrefecer e pesar - Calcinar à temperatura $450^\circ C$ durante 3h - Colocar num excicador até arrefecer e pesar	Adaptado de TAPPI- T222 de 1988



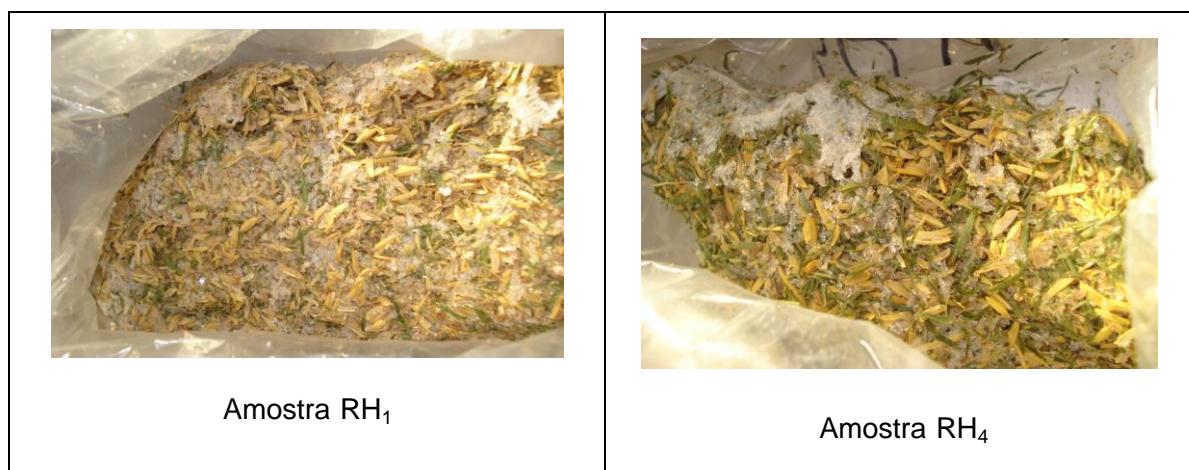
## 5.4 CARATERIZAÇÃO DO SUBSTRATO ORGÂNICO

### 5.4.1 CARATERIZAÇÃO DA MISTURA INICIAL

Para a caracterização da mistura inicial foram analisados diferentes parâmetros determinados de acordo com os métodos referidos na tabela 8: humidade, teor em sólidos voláteis, cinzas, pH, lenhina e azoto kjeldhal. A caracterização inicial das misturas está presente na tabela 9.

Ao efetuar-se a análise dos parâmetros verificou-se que os valores das réplicas nem sempre eram coincidentes, a variação entre as réplicas do mesmo ensaio eram semelhantes. Recorrendo-se à validação dos resultados através de um cálculo estatístico designado por Critério de Chauvenet, para rejeição de resultados (ver anexo A).

No que diz respeito ao substrato orgânico usado neste estudo é constituído por uma mistura de resíduos orgânicos como já foi referido anteriormente. É uma massa heterogénea onde no caso da mistura RH<sub>4</sub> predomina uma cor mais clara devido à maior presença em proporção (descritas na tabela 6) de casca de arroz e no caso de RH<sub>1</sub> uma cor mais escura devido à maior quantidade de casca de batata. Como se pode ver pela figura 15



**Figura 15** – Misturas orgânicas usadas neste estudo

A humidade que as misturas apresentam são favoráveis ao processo de compostagem pelo que não foi necessário adicionar água no início do processo de forma a ajustar esse valor. Nas tabelas seguintes encontram-se os valores obtidos experimentalmente, para cada um dos ensaios efetuados, para uma correta caracterização da mistura.

**Tabela 9** – Caracterização das misturas iniciais

Parâmetro	RH1	RH4
pH	6,58	6,31
Humidade [% m/m, btq]	73,60 %	69,60 %
Sólidos Voláteis, SV [% m/m, bs]	87,30 %	85,90 %
Lenhina Klason [% m/m, bs]	23,80 %	23,40 %
Azoto Kjeldhal [% m/m, bs]	1,09 %	1,44 %
C <sub>total</sub> / N <sub>org</sub>	38,8	32,8
C <sub>total</sub> (g/gms) <sup>1</sup>	0,426	0,459

<sup>1</sup> C<sub>total</sub> obtido por análise elementar

m/m – fracção mássica

btq – base tal e qual

bs – base seca

gms – grama de massa seca

## 6 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No decorrer do trabalho foi possível monitorizar os parâmetros descritos no capítulo anterior, obtendo-se os resultados relativos aos ensaios de compostagem.

### 6.1 MONITORIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE COMPOSTAGEM

Vai proceder-se à apresentação dos resultados obtidos experimentalmente no decorrer dos dois ensaios e posteriormente à sua discussão.

No procedimento experimental foram efetuados dois ensaios a diferentes temperaturas, (70°C, 50°C, 40°C e 30°C) para duas amostras diferentes (RH<sub>1</sub> e RH<sub>4</sub>). O tempo de reação foi de cerca 30 dias.

#### 6.1.1 CO<sub>2</sub> PRODUZIDO AO LONGO DO PROCESSO

Ao longo de todo o processo de compostagem o teor de CO<sub>2</sub> foi medido com recurso a um medidor de fluxo mássico e de um analisador de CO<sub>2</sub>, como já foi referido anteriormente.

Os valores foram registados através do computador e os dados obtidos, tratados para que fosse possível interpreta-los durante o processo de compostagem e calcular o volume acumulado de dióxido de carbono produzido durante o processo pela equação 5.

$$V_{CO_2} = \sum_{n=1}^n \frac{(y_{CO_2n-1} * Q_{a_{n-1}} + y_{CO_2} * Q_{a_n})}{2} (t_n - t_{n-1})$$

Eq. 5

Onde,

$y_{CO_2}$  = Fração molar do CO<sub>2</sub> no ar de exaustão, subtraída da fracção molar do CO<sub>2</sub> no ar de alimentação.

$Q_a$  = Caudal do ar de exaustão

$t$  = Tempo de reação

$n$  = instante em que se efetua a leitura dos parâmetros

Nas representações gráficas poderá observar-se diferentes parâmetros analisados (teor de CO<sub>2</sub> e a temperatura ao longo do tempo bem como o CO<sub>2</sub> acumulado em função do tempo e a massa de SV presentes nesse mesmo tempo.

Durante os vários períodos de análise verificou-se que existem intervalos de tempo sem dados. Esses intervalos podem dever-se a alguns fatores tais como, paragem de aquisição desses mesmos dados aquando das interrupções para as amostragens da parte sólida, a paragens por falta de energia ou ainda por problemas de leitura dos dados..

#### 6.1.2 CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL COMPOSTADO E GRAU DE CONVERSÃO

O material compostado sofre alterações relativas ao seu aspeto, cheiro, etc., como é esperado, pelo que é de bastante importância a sua observação no final do processo. Uma vez que é esperado um material mais homogêneo, sem grande odor e com um valor de humidade mais baixo.

Para além da observação do material compostado, foram realizadas análises laboratoriais para a sua caracterização final e no decorrer do processo, que para além de dar informações sobre o composto em si, pode também comparar-se, o substrato inicial e o produto de modo a retirar conclusões com interesse do ponto de vista das condições do processo.

A composição do material em base seca não dá informação direta sobre a degradação dos diferentes componentes desse material, o que faz com que o grau de conversão só seja possível de calcular usando massas absolutas ou frações mássicas relativas a uma mesma massa.

Uma vez que para a maioria dos substratos orgânicos sujeitos a processos de compostagem a massa de cinzas mantém-se constante, define-se uma fração designada fração de base seca cinza constante  $w_{jCC}$ , que corresponde à fração mássica que se verificaria se a massa total (seca) de sólidos voláteis tivesse permanecido constante e igual ao estado inicial.

A determinação da fração de um qualquer componente (j) em base de cinza constante (bcc) e do grau de conversão de sólidos voláteis pode ser calculada através das equações 6 e 7 respetivamente (Gomes, 2008).

Fração de um qualquer componente (j) em base de cinza constante (bcc)

$$w_{jCC,t} = w_{jR,t} * \frac{w_{zR,0}}{w_{zR,t}} \quad \text{Eq. 6}$$

Sendo,

$w_{jR}$  = Fração de j em base seca

$w_{jCC}$  = Fração de j em base de cinza constante

$w_{zR,0}$  = Fração de cinzas no instante 0, em base seca

$w_{zR,t}$  = Fração de cinzas no instante t, em base seca

Grau de conversão de sólidos voláteis

$$(X_{SV})_t = \frac{w_{SVRo} - w_{SVCCt}}{w_{SVRo}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde,

$(X_{SV})_t$  = Grau de conversão de sólidos voláteis no instante t

$w_{SV, Ro}$  = Fração de sólidos voláteis no instante 0, em base seca

$w_{SVCCt}$  = Fração de sólidos voláteis no instante t, em base seca cinza constante

Durante o processo de compostagem foram recolhidas purgas e condensado do gás de exaustão, que foram analisados relativamente ao seu volume e pH, bem como pequenas amostras do material em compostagem para se efetuarem análise aos sólidos voláteis, humidade, lenhina klason e azoto kjedahl.

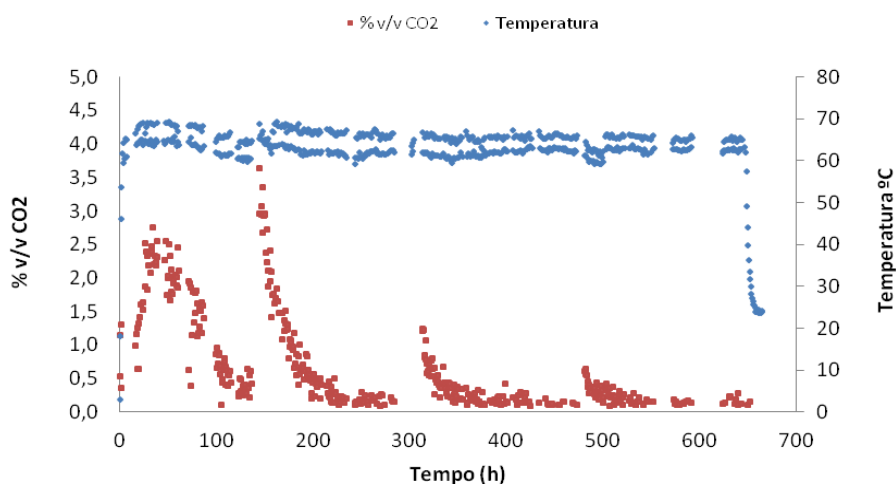
Ao efetuar-se a análise dos parâmetros, mais uma vez se verificou que os valores das réplicas nem sempre eram coincidentes recorrendo, assim, se à validação dos resultados através de um cálculo estatístico designado por Critério de Chauvenet, para rejeição de resultados (ver anexo A).

## 6.2 PRIMEIRO ENSAIO AMOSTRA RH<sub>1</sub>

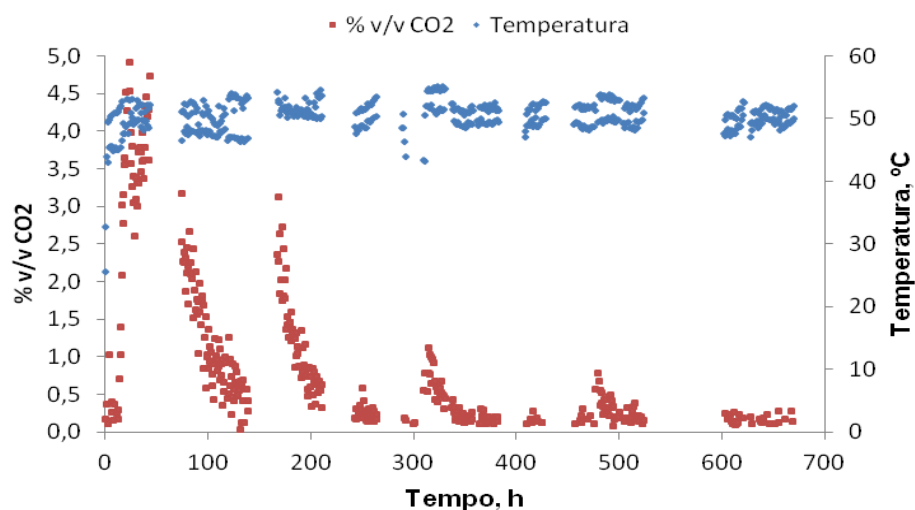
Nesta secção serão apresentados os resultados relativos à compostagem da mistura RH<sub>1</sub> em termos de evolução de CO<sub>2</sub> na fase gasosa e caracterização da fase sólida do material degradado.

### 6.2.1 CO<sub>2</sub> PRODUZIDO

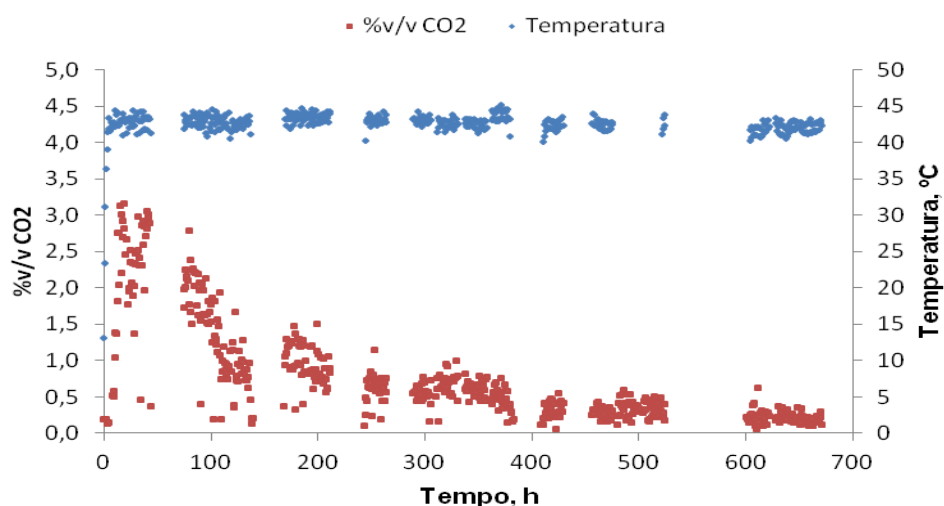
As Figuras 16, 17, 18 e 19 mostram as representações gráficas da variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão, corrigido para um caudal constante de 500 dm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>, bem como a variação da temperatura ao longo do tempo nos quatro reatores, para a mistura RH<sub>1</sub>.



**Figura 16** - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio A1 a 70°C



**Figura 17** - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio B1 a 50°C



- **Figura 18** - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio C1 a 40°C

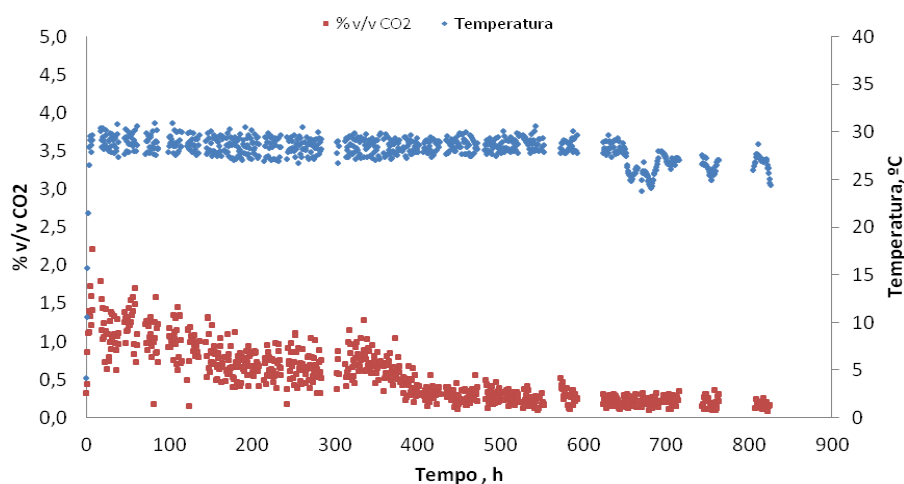


Figura 19 - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio D1 a 30°C

Através da análise gráfica, verifica-se que nos primeiros dias após o início do processo de compostagem, houve uma grande intensidade de reação biológica. Constatando-se esse fato com base nos valores obtidos para o teor de CO<sub>2</sub>, o que significa que nessas primeiras horas houve uma degradação acentuada de matéria orgânica facilmente biodegradável.

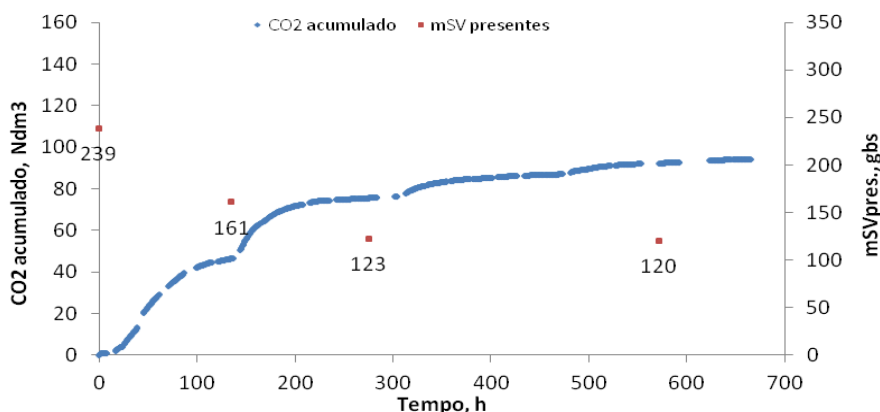
Verificou-se ao longo do processo que ao final de aproximadamente 35 h para o ensaio A1 atingiu o seu máximo de teor de CO<sub>2</sub> de cerca de 2,8%. Para o ensaio B1 o seu máximo foi atingido cerca das 25 h com cerca de 5% de CO<sub>2</sub>. No ensaio C1 o máximo foi

atingido ao fim de 19 h com cerca de 3,2% de  $\text{CO}_2$ . No ensaio D1 ao fim de 8 h atingiu-se o máximo com cerca de 2,2% de  $\text{CO}_2$ .

O teor de  $\text{CO}_2$  tende a estabilizar para um valor residual de cerca de 0,215%, 0,566%, 0,378% e 0,530% respetivamente para os ensaios, A1, B1, C1 e D1. O que significa que a intensidade da reação biológica diminuiu, o que significa escassez de matéria facilmente biodegradável. Contudo, mantém-se alguma atividade microbiológica residual.

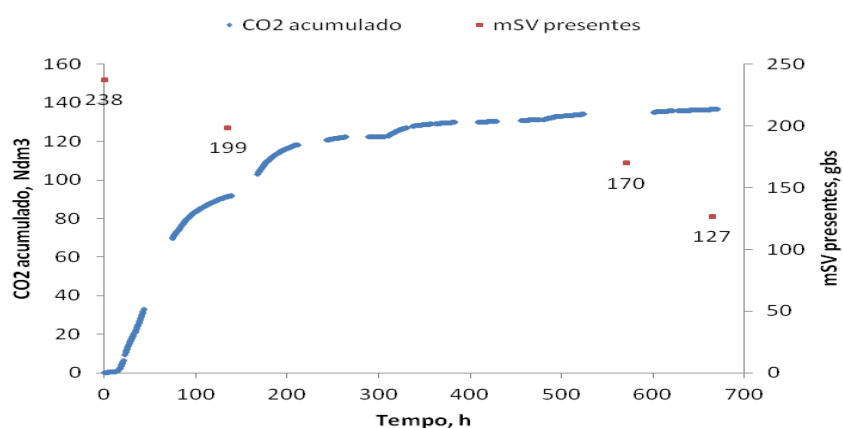
Verifica-se também que durante todo o processo existem oscilações no teor de  $\text{CO}_2$ , tais como picos, mais visíveis nos ensaios A1 e B1 (existindo também nos ensaios C1 e D1, mas não tão visíveis), que podem ter sido provocados pela paragem do processo para a abertura dos reatores e consequente revolvimento da massa de compostagem, permitindo assim a incorporação de  $\text{O}_2$  e a reoxigenação do material em compostagem, a zonas ainda frescas do substrato expostas como revolvimento.

As figuras 20, 21, 22, 23 e 24, ilustram o volume acumulado de  $\text{CO}_2$  ao longo do ensaio, bem como a evolução dos sólidos presentes.

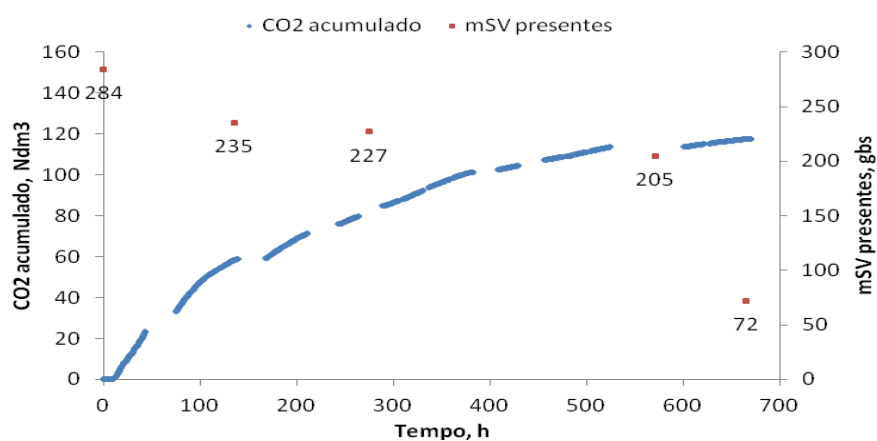


**Figura 20** - Volume de  $\text{CO}_2$  acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio A1 a 70°C

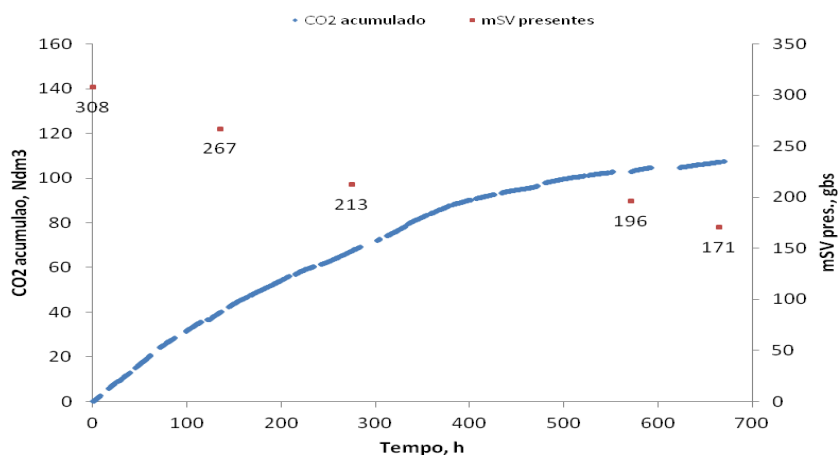




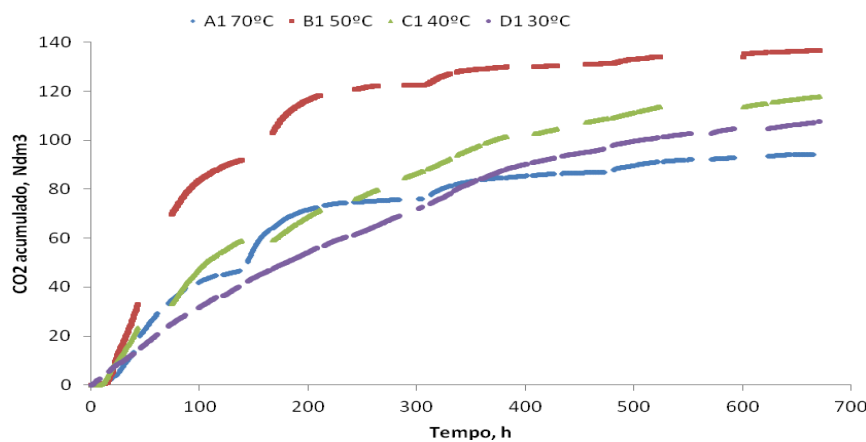
**Figura 21** - Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio B1 a 50°C



**Figura 22** - Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio C1 a 40°C



**Figura 23** - Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e massa de sólidos voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio D1 a 30°C



**Figura 24** – CO<sub>2</sub> acumulado dos quatro ensaios da mistura RH<sub>1</sub>

Na figura 24 compara-se os ensaios A1, B1, C1 e D1, observa-se uma fase de adaptação dos microrganismos, na qual a produção de CO<sub>2</sub> é muito reduzida, mais acentuada no ensaio A1. Ao longo do tempo a produção de CO<sub>2</sub> vai aumentando atingindo os seguintes máximos no fim do processo, 94,27 Ndm<sup>3</sup>, 136,52 Ndm<sup>3</sup>, 117,41 Ndm<sup>3</sup> e 107,11 Ndm<sup>3</sup> respetivamente para os ensaios A1, B1, C1 e D1. Este aumento de CO<sub>2</sub> está intimamente ligado à intensa degradação de matéria orgânica facilmente biodegradável, sendo que no ensaio D1 esse aumento é mais gradual do que nos outros ensaios em que se atinge uma estabilização de forma mais lenta.

Em relação à massa de sólidos voláteis presentes em todos os ensaios estes foram sempre diminuindo à medida que o CO<sub>2</sub> acumulado foi aumentando.

### 6.2.2 VARIAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

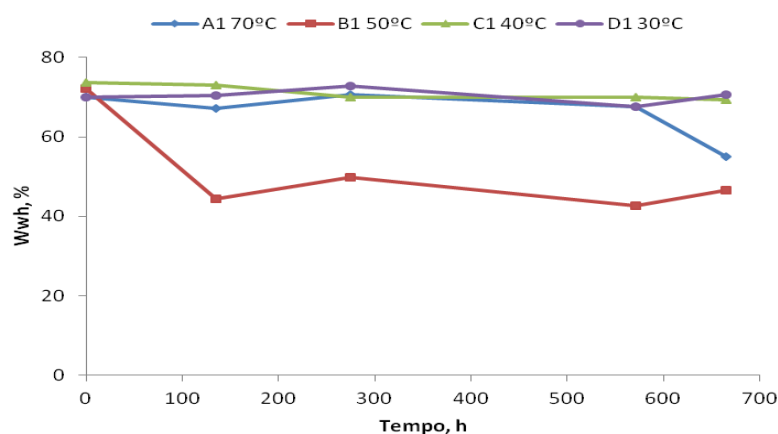
Ao longo do decorrer do ensaio foram sendo efetuadas paragens no processo para amostragens, retirou-se material do compostor e efetuou-se a amostragem e análise do teor de humidade ( $W_{WH}$ ). Através da tabela 10 e figura 25, consegue-se perceber como evoluiu a humidade ao longo do tempo. De referenciar que em certos reatores foi necessário repor água no momento do revolvimento, uma vez que através de apalpação do material e através da visão percebia-se que o valor da humidade encontrava-se abaixo do recomendado para o desenvolvimento microbiológico.

Assim no reator A1 foram adicionados 100 ml de água às seguintes horas, 135 h, 275 h e 571 h. No reator B1 foram adicionados 250ml de água às 135h, 200ml às 275 h e às 571 h. No reator D1 foram adicionados 100ml de água às 571 h. Através do gráfico da figura

25 obtém-se uma visualização mais clara da variação do teor de humidade da amostra RH<sub>1</sub> às diferentes temperaturas. O material do reator B poderá ter sofrido alguma inativação por falta de humidade. Este parâmetro poderá explicar a forma ondulada da curva da figura 21 mas não é justificação para a mesma forma ondulada da curva da figura 20. Os efeitos do revolvimento deverão estar na origem dessa forma ondulada das curvas das figuras 20 e 21.

**Tabela 10** – Variação do teor de Humidade ( $W_{WH}$ ) ao longo do tempo em pontos de amostragem

Tempo (h)	A1 70°C	B1 50°C	C1 40°C	D1 30°C
0	70,03	72,14	73,65	69,91
135	67,11	44,35	72,97	70,33
275	70,60	49,91	70,03	72,70
571	67,53	42,66	69,98	67,51
665	54,92	46,64	69,24	70,61



**Figura 25** – Variação do teor de humidade na mistura RH<sub>1</sub> às diferentes temperaturas

### 6.2.3 CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL COMPOSTADO E GRAU DE CONVERSÃO

O material compostado no final do 1º ensaio apresentava características diferentes como pode ser observado pela tabela 11. No que diz respeito a odor e granulometria, pode dizer-se quanto mais baixa a temperatura o odor era mais intenso e o material mais heterogéneo. A 70°C apresentava-se mais homogeneizado e o seu odor era ao semelhante a palha seca.

**Tabela11** – Caracterização do produto final do processo da compostagem do 1º ensaio

Reatores	A1 70°C	B1 50°C	C1 40°C	D1 30°C
Tempo [dias]	28	29	29	35
pH	7,92	9,14	9,28	8,89
Humidade [% m/m, btq]	56,00	49,00	69,00	72,00
Sólidos Voláteis, SV [% m/m, bs]	85,00	84,00	83,00	83,00
Lenhina [% m/m, bs]	31,00	35,00	30,00	52,00
Azoto kjeldhal [% m/m, bs]	0,56	0,83	1,48	1,21

Outros parâmetros determinados ao longo de todo o processo foram, o pH e o volume das purgas, cuja variação também tem interesse em ser analisado, pois este provém do excesso de humidade que condensa dentro do compostor promovendo assim a sua produção. Na tabela 12 será apresentado o valor do pH das purgas ao longo do processo de amostragens. Como se pode verificar os valores de pH rondam a gama alcalina próxima da neutra.

**Tabela12** - Variação do pH das purgas

Reatores	A1 70°C	B1 50°C	C1 40°C	D1 30°C
1ª Amostragem	8,47	8,00	8,51	-
2ª Amostragem	8,53	8,71	8,86	-
3ª Amostragem	8,83	9,01	8,38	9,00
4ª Amostragem	8,19	8,87	8,00	9,00
5ª Amostragem	8,84	8,84	-	7,00
6ª Amostragem	-	-	-	7,86

Em relação ao grau de conversão dos sólidos voláteis, foi calculado a partir das equações 6 e 7.

Através da informação presente na tabela 9, sobre a composição em carbono da mistura,  $C_{\text{total}}$  é de 0,426 g/gms, é possível estimar o volume máximo de  $\text{CO}_2$  que seria volatilizado (se todo o carbono fosse biodegradável). Na tabela 13 são apresentados os valores de massa seca e carbono total no início de cada experiência, bem como o volume máximo esperado de  $\text{CO}_2$ .

**Tabela 13** - Valores de massa seca da amostra, volume máximo esperado de  $\text{CO}_2$  e massa de carbono a diferentes temperaturas

Amostra	RH <sub>1</sub>		
Temperatura	Massa seca [g]	Massa de carbono [g]	$V_{\text{máximo}}$ esperado de $\text{CO}_2$ [Ndm <sup>3</sup> ]
70°C	289,29	123	230
50°C	268,96	115	214
40°C	320,63	137	255
30°C	365,93	156	291

Na tabela 14 é apresentado o grau de conversão de sólidos voláteis, final bem como o volume final de  $\text{CO}_2$  acumulado e esperado e a percentagem de carbono degradado ao longo do processo.

**Tabela 14** – Grau de conversão de sólidos voláteis, Volume máximo esperado de  $\text{CO}_2$ , Volume de  $\text{CO}_2$  acumulado e percentagem de Carbono degradado

Amostra	RH <sub>1</sub>			
Temperatura	Grau de Conversão de Sólidos Voláteis [%]	$V_{\text{máximo}}$ esperado de $\text{CO}_2$ [Ndm <sup>3</sup> ]	Volume $\text{CO}_2$ acumulado [Ndm <sup>3</sup> ]	Carbono degradado [%]
70°C	33,0	230	94	41,0
50°C	25,4	214	137	63,9
40°C	27,8	255	117	46,0
30°C	35,0	291	107	36,8

Através da análise da tabela 14, verifica-se que o grau de conversão de sólidos voláteis apresenta valores mais baixo do que os valores de carbono degradado. Este fato pode ser sido devido à falta de representatividade das amostras recolhidas para análise. Pode

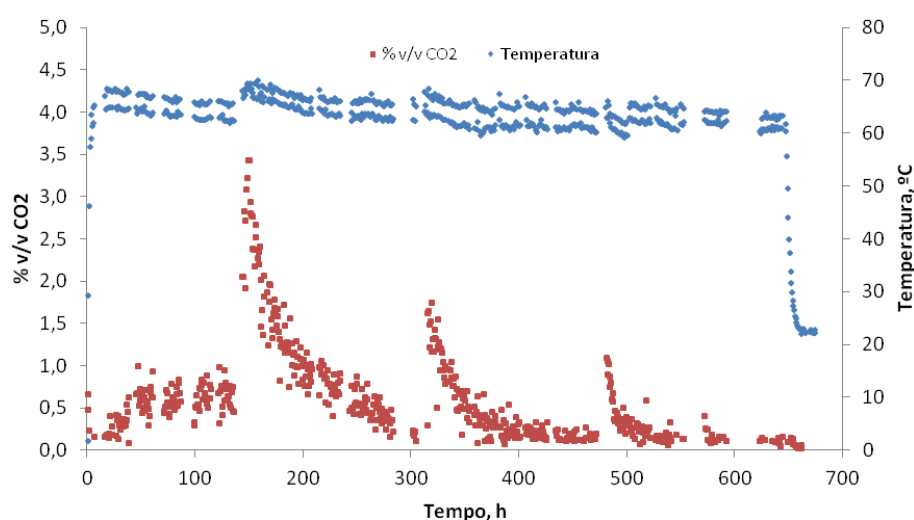
também verificar-se que o maior grau de conversão de sólidos voláteis ocorre à temperatura de 30°C, temperatura à qual o volume esperado de CO<sub>2</sub> também é maior. Contudo a maior percentagem de carbono degradado ocorreu à temperatura de 50°C.

### 6.3 SEGUNDO ENSAIO AMOSTRA RH<sub>4</sub>

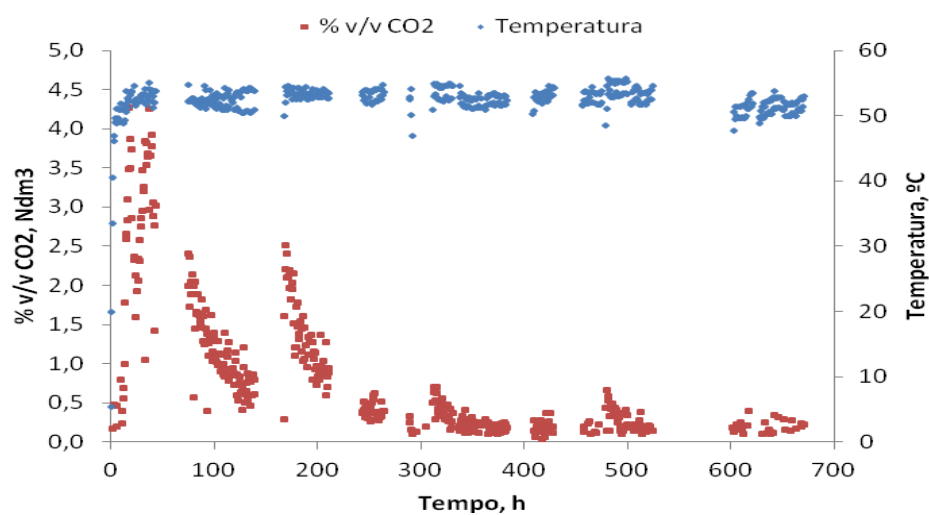
Nesta secção serão apresentados os resultados relativos à compostagem da mistura RH<sub>4</sub> em termos de evolução de CO<sub>2</sub> na fase gasosa e caracterização da fase sólida do material degradado.

#### 6.3.1 CO<sub>2</sub> PRODUZIDO

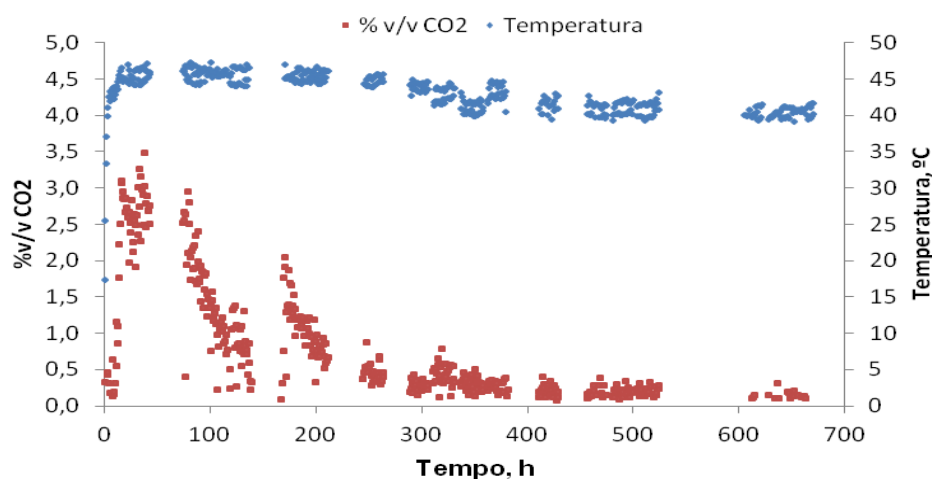
As Figuras 26, 27, 28 e 29 mostram as representações gráficas da variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão, corrigido para um caudal constante de 500 dm<sup>3</sup>min<sup>-1</sup>, bem como a variação da temperatura ao longo do tempo nos quatros reatores, para a mistura RH<sub>4</sub>.



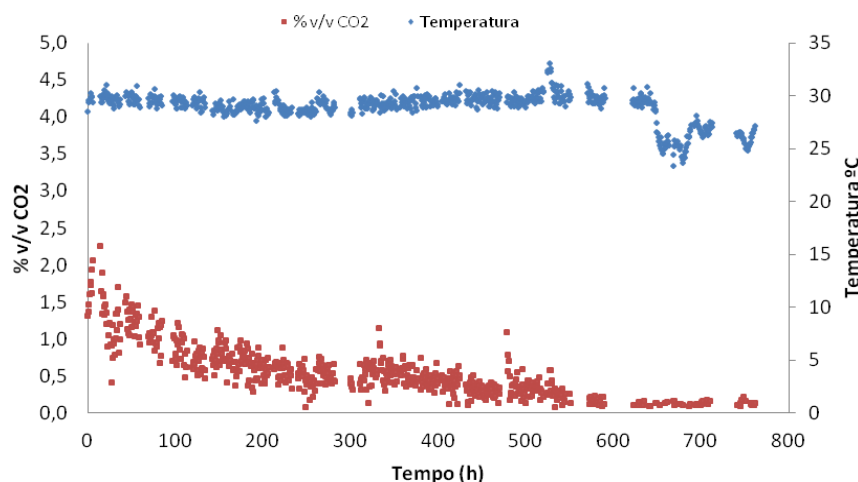
**Figura 26** - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio A2 a 70°C



**Figura 27** - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio B2 a 50°C



**Figura 28** - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio C2 a 40°C



**Figura 29** - Variação do teor de CO<sub>2</sub> no gás de exaustão e da temperatura ao longo do tempo no ensaio D2 a 30°C

Através da análise gráfica, verifica-se que nos primeiros dias após o início do processo de compostagem, houve uma grande intensidade de reação biológica. Constatando-se esse fato com base nos valores obtidos para o teor de CO<sub>2</sub>, o que significa que nessas primeiras horas houve uma degradação acentuada de matéria orgânica facilmente biodegradável.

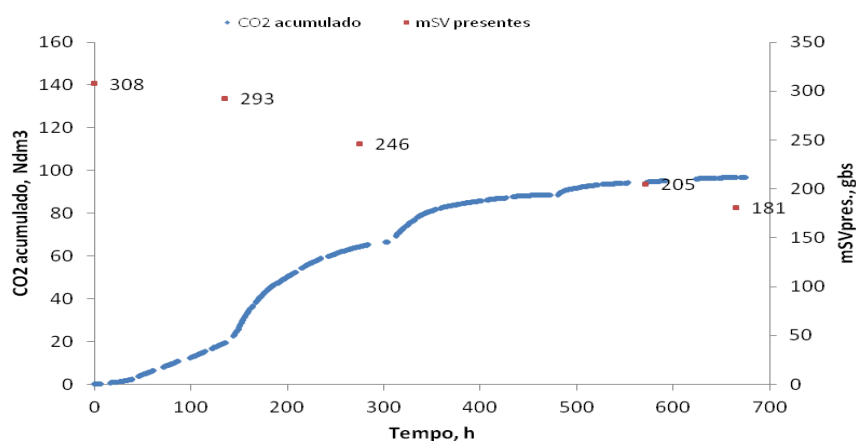
Verificou-se ao longo do processo que ao final de aproximadamente 47 h para o ensaio A2 atingiu o seu máximo de teor de CO<sub>2</sub> de cerca de 1%. Para o ensaio B2 o seu máximo foi atingido cerca das 17 h com cerca de 4% de CO<sub>2</sub>. No ensaio C2 o máximo foi atingido ao fim de 38 h com cerca de 3,4% de CO<sub>2</sub>. No ensaio D1 ao fim de 15 h atingiu-se o máximo com cerca de 2,3% de CO<sub>2</sub>.

O teor de CO<sub>2</sub> tende a estabilizar para um valor residual de cerca de 0,453%, 0,464%, 0,228% e 0,460% respectivamente para os ensaios, A2, B2, C2 e D2. O que significa que a intensidade da reação biológica diminuiu, o que significa escassez de matéria facilmente biodegradável. Contudo mantém-se alguma atividade microbiológica residual.

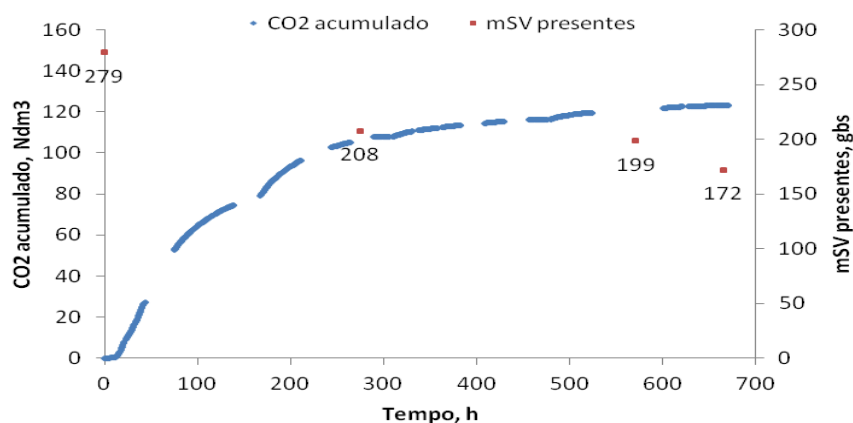
Verifica-se também que durante todo o processo existem oscilações no teor de CO<sub>2</sub>, tais como picos, mais visíveis nos ensaios A2, B2 e C2 (existindo também no ensaio D2, mas não tão visível), que podem ter sido provocados pela paragem do processo para a abertura dos reatores e consequente revolvimento da massa de compostagem, permitindo assim a incorporação de O<sub>2</sub> e a reoxigenação do material em compostagem, a zonas ainda frescas do substrato expostas como revolvimento.



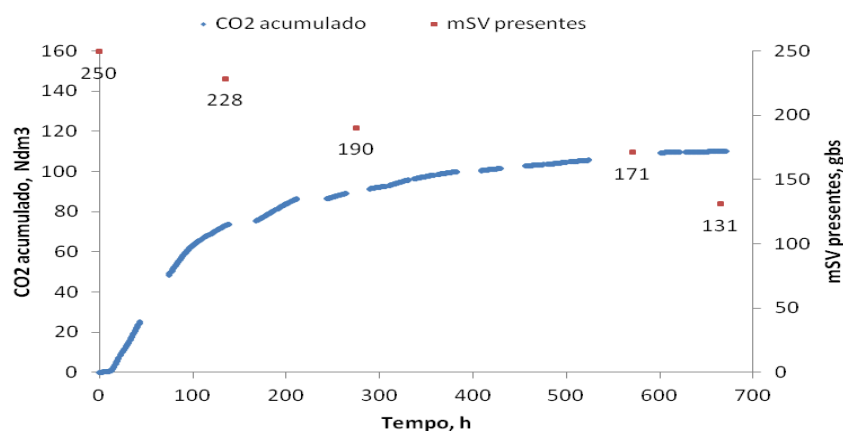
As figuras 30, 31, 32, e 33, ilustram o volume acumulado de CO<sub>2</sub> ao longo do ensaio, bem como a evolução dos sólidos presentes



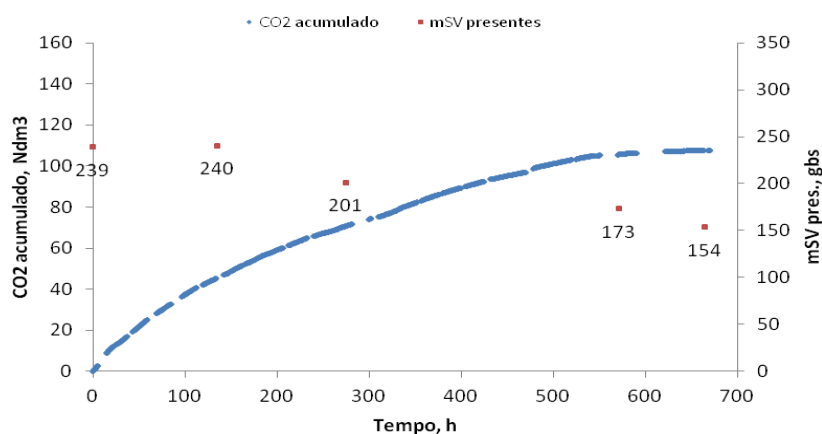
**Figura 30** - Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio A2 a 70°C



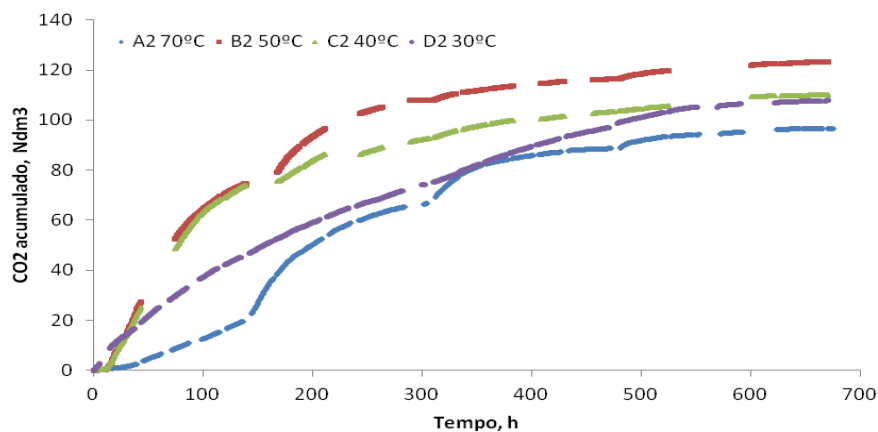
**Figura 31** - Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio B2 a 50°C



**Figura 32** - Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio C2 a 40°C



**Figura 33** - Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e massa de Sólidos Voláteis presentes ao longo do tempo no ensaio D2 a 30°C



**Figura 34** - CO<sub>2</sub> acumulado dos quatro ensaios da mistura RH<sub>4</sub>

Na figura 34 compara-se os ensaios A2, B2, C2 e D2 observa-se uma fase de adaptação dos microrganismos, na qual a produção de  $\text{CO}_2$  é muito reduzida mais acentuada no ensaio A2. Ao longo do tempo a produção de  $\text{CO}_2$  vai aumentando atingindo os seguintes máximos no fim do processo, 96,70 Ndm<sup>3</sup>, 123,24 Ndm<sup>3</sup>, 110,14 Ndm<sup>3</sup> e 107,71 Ndm<sup>3</sup> respetivamente para os ensaios A2, B2, C2 e D2. Este aumento de  $\text{CO}_2$  está intimamente ligado à intensa degradação de matéria orgânica facilmente biodegradável, sendo que no ensaio D2 esse aumento é mais gradual do que nos outros ensaios em que se atinge uma estabilização mais lenta.

Em relação à massa de sólidos voláteis presentes em todos os ensaios estes foram sempre diminuindo à medida que o  $\text{CO}_2$  acumulado foi aumentando.

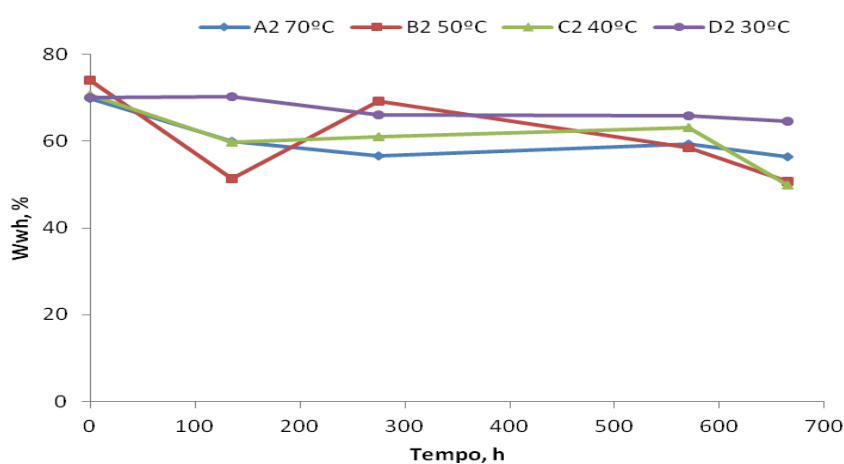
### 6.3.2 VARIAÇÃO DO TEOR DE HUMIDADE

Ao longo do decorrer do ensaio foram sendo efetuadas paragens no processo para amostragens, retirou-se material do compostor e efetuou-se a amostragem e análise do teor de humidade ( $W_{WH}$ ). Através da tabela 15 e figura 35 consegue-se perceber como evoluiu a humidade ao longo do tempo. De referenciar que em certos reatores foi necessário adicionar água no momento do revolvimento, uma vez que através de apalpação do material e através da visão percebia-se que o valor da humidade encontrava-se abaixo do recomendado para o desenvolvimento microbiológico.

Assim no reator A2 foram adicionados 200 ml de água às 135 h, 100ml às 275 h e 100ml às 571h. No reator B2 foram adicionados 400ml de água às 135h e 104ml às 571 h. No reator C2 foram adicionados 100ml de água às 135 h e mais 100ml às 275 h. Através do gráfico da figura 35 obtém-se uma visualização mais clara da variação do teor de humidade da amostra  $\text{RH}_4$  às diferentes temperaturas. O material dos reatores poderá ter sofrido alguma inativação por falta de humidade. Os efeitos do revolvimento deverão estar na origem dessa forma ondulada das curvas da figura 34.

**Tabela 15** – Variação do teor de Humidade ( $W_{WH}$ ) ao longo do tempo em pontos de amostragem

Tempo (h)	A2 70°C	B2 50°C	C2 40°C	D2 30°C
0	69,91	74,08	70,72	70,03
135	60,01	51,28	59,69	70,29
275	56,66	69,25	60,98	66,14
571	59,46	58,63	63,08	65,98
665	56,44	50,77	49,82	64,72



**Figura 35** - Variação do teor de humidade na mistura  $RH_4$  às diferentes temperaturas

### 6.3.3 CARATERIZAÇÃO DO MATERIAL COMPOSTADO E GRAU DE CONVERSÃO

O material compostado no final do 2º ensaio apresentava características diferentes como pode ser observado pela tabela 16. No que diz respeito a odor e granulometria, pode dizer-se que quanto mais baixa a temperatura o odor era mais intenso e o material mais heterogéneo. A 70°C apresentava-se mais homogeneizado e o seu odor era ao semelhante a palha seca.

**Tabela 16** - Caracterização do produto final do processo da compostagem do 2º ensaio

Reatores	A2 70°C	B2 50°C	C2 40°C	D2 30°C
Tempo [dias]	28	29	29	35
pH	7,35	9,22	9,14	8,60
Humidade [% m/m, btq]	55,00	47,00	50,00	73,00
Sólidos Voláteis, SV [% m/m, bs]	82,00	82,00	81,74	83,17
Lenhina [% m/m, bs]	31,39	34,56	29,73	52,31
Azoto kjeldhal [% m/m, bs]	0,94	1,11	1,53	1,02

Outros parâmetros determinados ao longo de todo o processo foram, o pH e o volume das purgas, cuja variação também tem interesse em ser analisado, pois este provém do excesso de humidade que condensa dentro do compostor promovendo assim a sua produção. Na tabela 17 será apresentado o valor do pH das purgas ao longo do processo de amostragens. Como se pode verificar ao longo do processo os valores de pH rondam a gama alcalina próxima da neutra.

**Tabela17** - Variação do pH das purgas

Reatores	A2 70°C	B2 50°C	C2 40°C	D2 30°C
1ª Amostragem	7,00	9,00	8,96	-
2ª Amostragem	8,00	8,62	8,62	-
3ª Amostragem	8,00	8,69	8,65	9,00
4ª Amostragem	6,00	8,52	8,63	9,00
5ª Amostragem	-	8,60	7,00	7,00
6ª Amostragem	-	-	-	7,86

Na tabela 18 são apresentados os valores obtidos através de cálculo para o volume máximo de CO<sub>2</sub>

**Tabela 18** - Valores de massa seca da amostra, volume máximo esperado de CO<sub>2</sub> e massa de carbono a diferentes temperaturas

Amostra	RH <sub>4</sub>		
Temperatura	Massa seca [g]	Massa de carbono [g]	V <sub>máximo</sub> esperado de CO <sub>2</sub> [Ndm <sup>3</sup> ]
70°C	365,93	168	314
50°C	315,29	145	291
40°C	282,64	130	242
30°C	289,31	133	248

O grau de conversão dos sólidos voláteis é calculado a partir das equações 6 e 7.

Na tabela 19 é apresentado o grau de conversão de sólidos voláteis, final bem como o volume final de CO<sub>2</sub> acumulado e esperado e a percentagem de carbono degradado ao longo do processo.

**Tabela 19** - Grau de conversão de sólidos voláteis, Volume máximo esperado de CO<sub>2</sub>, Volume de CO<sub>2</sub> acumulado e percentagem de Carbono degradado

Amostra	RH <sub>4</sub>			
Temperatura	Grau de Conversão de sólidos Voláteis [%]	V <sub>máximo</sub> esperado de CO <sub>2</sub> [Ndm <sup>3</sup> ]	Volume CO <sub>2</sub> acumulado [Ndm <sup>3</sup> ]	Carbono degradado [%]
70°C	23,4	314	96,7	30,8
50°C	13,5	291	123	42,4
40°C	23,4	242	110	45,5
30°C	15,8	248	108	43,4

Através da análise da tabela 19, verifica-se que o grau de conversão de sólidos voláteis apresenta valores mais baixo do que os valores de carbono degradado. Este fato pode ser devido à falta de representatividade das amostras recolhidas para análise. Pode também verificar-se que o maior grau de conversão de sólidos voláteis ocorre à temperatura de 70°C e 40°C com igual valor, contudo a temperatura à qual o volume

esperado de CO<sub>2</sub>, é maior é a temperatura de 70°C. A maior percentagem de carbono degradado ocorreu à temperatura de 40°C.

## 7 CONCLUSÕES

Após a realização deste estudo é possível chegar a algumas conclusões.

A primeira conclusão que podemos retirar é em relação à degradação do material. Durante o processo de compostagem foram testadas duas misturas com os mesmos componentes, mas em proporções diferentes. Essas misturas foram compostadas em quatro reatores às temperaturas, 70°C, 50°C, 40°C e 30°C. Após a análise dos resultados podemos concluir que a mistura que degrada melhor, é a mistura RH<sub>1</sub> pois apresenta valores de volume de CO<sub>2</sub> libertado mais elevados do que a amostra RH<sub>4</sub>. Podemos ainda concluir que a temperatura em que o processo de degradação é mais extenso é à temperatura de 50°C.

A temperatura do processo pode conduzir à, auto inibição da compostagem, pois impede e retarda o crescimento da maioria dos microrganismos residentes, diminuindo assim a decomposição da matéria orgânica. Como foi referenciado anteriormente, a gama ótima de temperatura para que o processo de compostagem decorra favoravelmente é entre os 50°C – 60°C, o está de acordo com os resultados obtidos e a conclusão apresentada.

Houve a necessidade de se efetuar o revolvimento do material em compostagem para homogeneização e correção da humidade, através adição de água, de modo a conduzir o processo com uma humidade adequada, 50 a 60 %. Ao analisar os resultados podemos concluir que apesar das humidades iniciais serem ligeiramente diferentes RH<sub>1</sub> – 69,6 % e RH<sub>4</sub> – 73,6 % a mistura que teve melhor comportamento foi a RH<sub>4</sub> que manteve sempre valores mais ou menos constantes de humidade, enquanto que a mistura RH<sub>1</sub> à temperatura de 50°C, apesar da adição de água, o teor de humidade caiu para valores da ordem dos 40%.

Em relação ao pH, o pH da purga é um bom indicador do pH da massa em compostagem. Este deve manter-se na gama ótima entre os 5,5 – 8,0, geralmente diminuindo no inicio do processo durante a fase mesófila como consequência da atividade das bactérias formadoras de ácidos que ao hidrolisarem os materiais orgânicos complexos, originam ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Durante estes dois ensaios comportamento ocorreu de forma semelhante. De referir que em ambos os reatores que operaram a 30° o pH manteve-se mais baixo.

No que diz respeito ao grau de conversão de sólidos voláteis podemos concluir que a mistura que se comportou melhor foi a RH<sub>1</sub>, tendo valores aproximados dos 30%. Em



termos de volume acumulado de  $\text{CO}_2$  a mistura que teve melhor comportamento foi a  $\text{RH}_1$  aproximando-se mais dos valores para o volume máximo esperado de  $\text{CO}_2$ , indicando assim maior capacidade de degradação.

Podemos assim concluir que a amostra que apresenta melhor características para a compostagem é a amostra  $\text{RH}_1$  e a temperatura a que opera melhor é a  $50^\circ\text{C}$ , temperatura à qual a fracção de carbono degradado atingiu 64%. Contudo, para que o processo de degradação da matéria orgânica biodegradável ocorra nas condições mais favoráveis deverá ter lugar a monitorização da humidade e eventual ajuste.

## Referências bibliográficas

Agência Portuguesa do Ambiente (2013a). Relatório do Estado do Ambiente 2012 (REA), disponível em URL: <http://sniamb.apambiente.pt/docs/REA/rea2012.pdf> (acedido em Setembro de 2013)

Agência Portuguesa do Ambiente (2013b). Resíduos, disponível em URL: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84> (acedido em Setembro 2013)

Agência Portuguesa do Ambiente (2013c). Dados sobre Resíduos, disponível em URL: <http://www.apambiente.pt/index.php?ref=16&subref=84&sub2ref=933&sub3ref=936> (acedido em Setembro de 2013)

Aquino, A. M. de., D.L. de. Almeida, J.G.M. Guerra e H. De-Polli. 2005 Biomassa microbiana, colóides orgânicos e nitrogénio inorgânico durante a vermicompostagem de diferentes substratos. Pes. Agropec. Bras.,40: 1087-1093 pp

Baptista, M.H.C., 2009. “Modelling of kinetics of municipal solid waste composting in full scale mechanical – biological treatment plants”. Faculty of Sciences and Technology of the new University of Lisbon, Lisboa

Barata, I., 1999. “ Modelização do Processo de Compostagem”. Projeto. Departamento de Ambiente e Ordenamento. Universidade de Aveiro

Brito, L.M.C.M. 2005. *Manual de Compostagem*. Escola Superior Agrária de Ponte de Lima, Instituto Politécnico de Viana do Castelo. Disponível em: [http://www.ci.esapl.pt/mbrito/compostagem/Manual\\_Compostagem.htm](http://www.ci.esapl.pt/mbrito/compostagem/Manual_Compostagem.htm). Consultado em: Setembro de 2013

Chang, J.I., Tsai, J.J., Wu, K.H., 2006. Thermophilic composting of food waste. Bioresource Technology 96, 116–122.

Cordeiro, N. M. (2010.) *Compostagem de Resíduos de Resíduos verdes e Avaliação da Qualidade dos compostos obtidos – caso de estudo da Algar S.A.* Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente – Tecnologias Ambientais. Instituto Superior de Agronomia Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 4, 6-7 pp.

Costa, F., García, C., Hernández, T., Polo, A. 1991. *Residuos Sólidos Urbanos: Manejo y Utilización*. CSIC, Múrcia.

Cunha Queda, A.C.F. 1999. *Dinâmica do azoto durante a compostagem de materiais biológicos putrescíveis*. Dissertação de doutoramento em Engenharia Agro-Industrial, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa, Portugal. 257pp

Cunha-Queda, A.C., Vallini, G., Agnolucci, M., Coelho, C.A., Campos, L., Bruno de Sousa, R. 2002. Microbiological and chemical characterisation of composts at different levels of maturity, with evaluation of phytotoxicity and enzymatic activities, in: Insam, H.,

Decisão da Comissão 2006/799/CE de 3 de novembro de 2006, estabelece critérios ecológicos revistos e requisitos de avaliação e verificação para a atribuição do rótulo ecológico comunitário aos corretivos de solos, Jornal Oficial da União europeia de 24 de Novembro de 2006

Decreto-lei 73/2011 de 17 de Junho, que estabelece a terceira alteração do Decreto-Lei n.º 178/2006, de 5 de setembro e transpõe a Diretiva n.º 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de novembro de 2008, relativa aos resíduos. Diário da República 1ª série, nº 116 de 17 de Junho de 2011

Decreto-Lei 183/2009 de 10 de Agosto, aprova o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro, e os requisitos gerais a observar na conceção, construção, exploração, encerramento e pós-encerramento de aterros incluindo as características técnicas específicas para cada classe de aterros. Diário da República, nº 153, Série I, de 10 de Agosto de 2009

Diretiva 1999/31/CE de 26 de Abril de 1999, relativa à deposição de resíduos em aterro, Jornal Oficial da União europeia de 16 de Julho de 1999

Felicia, D.G., (2009) Estudo do comportamento do resíduo papel no processo de compostagem. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade de Aveiro.

Fernandes, P.A.L. (1999) *Estudo Comparativo e Avaliação de Diferentes Sistemas de Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Coimbra, Coimbra, 113 pp.

Gomes, A. P. (2001). *Fundamentos da Compostagem de Resíduos Sólidos*, Tese de Doutoramento da Universidade de Aveiro

Gomes, A. P., Pereira, F. A., 2008. Mathematical modelling of a composting process and validation with experimental data. Waste Management & research 26 (3), 276 - 287

Haug, R. T. (1993). *The practical handbook of compost engineering*, Lewis Publishers Inc. USA

Hughes, E.G. (1980) *The Composting of Municipal Wastes* – in Handbook of Organic Waste Conversion, Edit. Michael WM Bewick, Van Nostrand Reinhold, Env. Engrs. Series (cit. Fernandes, 1999).

Ideias Ambientais (2013). *Compostagem*, disponível em URL: <http://www.ideiasambientais.com.pt/compostagem.html> (acedido a 03 de Setembro de 2013)

Jiménez, E. I. e V. P. Garcia. 1989 Evaluation of city refuse compost stability : a review. Biol. Waste. Inter. Biodeg., 56: 101 – 108 pp

Kiehl, E. j. 2004. *Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto*. 4ª ed. E. J Kiehl. Piracicaba. 173 pp

Marques, A. S. M. L. C., 2008 Valorização orgânica do Subproduto da Destilação do Bagaço de Uva. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente. Universidade de Aveiro

Masson, I. G., 2006. Mathematical modelling of the composting process: a review. Waste Management 26 (1), 3 – 21

Mason, I. G., 2006. An evaluation of substrate degradation patterns in the composting process. Part 1: Profiles at constant temperature. Waste Management 28 (9), 1598 - 1608

Matos, M.A.A. (2009) *Tratamento Biológico Compostagem*, in Tratamento e Gestão de resíduos Sólidos V/12, apontamentos teóricos da disciplina, Departamento de Ambiente Ordenamento, Universidade de Aveiro

Oliveira, E.C.A, Sartori, R.H., Garcez, T. B. 2008. *Compostagem*, Programa de pós graduação em solos e nutrição de plantas. Universidade de São Paulo. Disponível em URL: [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Compostagem\\_000fhc8nfqz02wyiv80efhb2adn37yaw.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Compostagem_000fhc8nfqz02wyiv80efhb2adn37yaw.pdf) (consultado em Julho de 2013)

Pereira Neto, J. T. 1996. *Manual de Compostagem: processo de baixo custo*. Universidade Federal de Viçosa. 81 pp

Portaria nº 15/ de 23 de Janeiro, Aprova os tipos de operações de eliminação e de valorização de resíduos. Diário da República, nº19/96 série I-B, de 23 de Janeiro de 1996

Portaria n.º 851/09, de 07 de Agosto, aprova as normas técnicas relativas à caracterização de resíduos urbanos. Diário da República, 1ª série, N.º152 de 07 de Agosto de 2009

Primavesi, A. 1981. O manejo ecológico do solo: agricultura em regiões tropicais. Nobel São Paulo. 535 pp.

Proposta de norma técnica sobre qualidade e utilizações do composto, 26 de Abril de 2006. Documento baseado na “Proposta de norma portuguesa sobre qualidade do Composto para utilização na agricultura”, Outubro de 2001, e no “Working Document – Biological Treatment of Biowaste – 2<sup>nd</sup> Draft”, DG ENV.A.2, Fevereiro de 2001.

Richard, T., N. Trautmann, M.Krasny, S.Fredenburg and C. Stuart.2002. The Science and engineering of composting. The Cornell composting

Riddech, N., Klammer, S. (Eds.), Microbiology of Composting. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany. 346-355pp

Rodrigues, M. S., F. C. da Silva, L. P. Barreira e A. Kovacs. 2006. Compostagem: reciclagem de resíduos orgânicos. In: Spadotto, C. A.; Ribeiro, W. Gestão de Resíduos na agricultura e agroindústria. FEPAF. Botucatu. 63 – 94 pp

Russo, M. A. T., 2003. *Tratamento de resíduos Sólidos*. Universidade de Coimbra. Faculdade de Ciências e Tecnologia Departamento de Engenharia Civil. (13, 58, 60 – 62 pp)

Santos, J. L. D., 2007. Caracterização Físico-Química e biológica em diferentes laboratórios de produtos obtidos a partir da Compostagem de Resíduos Biodegradáveis. Dissertação de Mestrado em Ecologia Aplicada apresentada à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. 15 pp.

UniSant’ana (2013), Geografia para quem não sabia, disponível em URL: <http://geounisantanna.blogspot.pt/p/curriculos.html> (acedido em Setembro de 2013)

Wikipédia (2013). *Resíduos Sólidos Urbanos*, disponível em URL: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Rsu> (acedido em Setembro de 2013)

Xi, B., Z. Wei, H. Liu. 2005. *Dynamic Simulation for Domestic Solid Waste Composting Processes*. The Journal of American Science 1 (1), 2005, Xi, et al, Dynamic Simulation for Domestic Solid Waste. 34 – 35pp

Zucconi, F. and m. Bertoldi. 199. *Specification for sol waste compost*. In The biocycle guide to the art & science of composting. J.G. Press

## Anexo A – Critério de Chauvenet

Dado um conjunto de valores medidos ou determinados experimentalmente, alguns dos elementos desse conjunto extrapolarão a tendência dominante. Poderão efetivamente tratar-se de medições erradas ou ter um significado físico interessante. Por esta razão não podem ser rejeitados sem recorrer a um determinado critério. No caso em estudo, o recurso a um critério de rejeição de dados está relacionado com o fato de as determinações terem sido realizadas em tempo e possivelmente condições diferentes, pelo que os valores obtidos devem de ser validados.

Sejam  $n$  medições de uma grandeza, de modo que os resultados seguem uma distribuição Gaussiana, que fornece a probabilidade de que um dado valor medido esteja desviado da média esperada, de um determinado valor. Não se pode esperar probabilidade menor que  $1/n$ . Assim, se a probabilidade para o desvio de um certo valor medido é menor que  $1/n$ , poderá ser eliminado do conjunto de dados.

Este critério especifica que um valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade de se obter o desvio em relação à média é menor que  $1/2n$ . Na tabela A 1 é apresentado os valores da razão do desvio em relação ao desvio para vários valores de  $n$ , de acordo com este mesmo critério.

**Tabela A 1 – Critério de Chauvenet para a rejeição de valor medido**

Número de Leituras	Razão entre o máximo desvio aceitável e o desvio padrão
$n$	$dmáx. \sigma$
3	1,38
4	1,54
5	1,65
6	1,73
7	1,80
10	1,96
15	2,13
25	2,33

50	2,57
100	2,81
300	3,14
500	3,29
1000	3,48

Para aplicar o critério de Chauvenet para eliminar valores segue-se o seguinte método;

Calcular o desvio do valor medido em relação à média dos valores medidos e o seu desvio padrão

Determinar a razão entre as duas grandezas calculadas

Comparar o valor da razão obtida com os valores da tabela A 1, eliminando os pontos que sejam superiores ao critério limite

Calcular novo valor médio e novo desvio padrão, sem incluir os pontos eliminados.

Este critério poderia ser repetido mais uma vez, para a eliminação de mais pontos, contudo o procedimento não é recomendável. Se diversos pontos extrapolarem o critério limite estabelecido é provável que o sistema de instrumentação seja inadequado ou que o processo sendo medido seja extremamente variável.

Este critério então fornece uma base consistente para a tomada de decisão de excluir ou não um dado, de um conjunto de valores medidos.





